

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Analýza technologie ohýbání ocelových
trubek za tepla**

Hot Bending Analysis of Steel Tubes

Student: Rentka Josef

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2009

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Josef Rentka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza technologie ohýbání ocelových trubek za tepla**
Hot Bending Analysis of Steel Tubes

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií ohýbání ocelových trubek za tepla
2. Metody predikce tvářecích sil ohýbání trubek za tepla
3. Sestavení konstitutivní matice a modelu procesu ohýbání
4. Analýza technologie ohýbání trubek pro materiálové reprezentanty
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilových parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
STANGE, R. *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

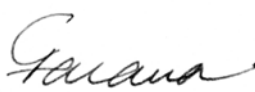
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

Plné jméno diplomanta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Rentka, J. *Analýza technologie ohýbání ocelových trubek za tepla*. Ostrava: Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB- TU, 2009, 90 s.

Diplomová práce, vedoucí: prof. Ing.Hrubý, J.CSc.

V diplomové práci jsou představeny technologie ohýbání trubek, schémata sestavení jednotlivých nástrojů. Možnosti výpočtu potřebných sil pro ohyb, a parametry ohybů. Na dvou rozměrech trubky je provedena analýza sil působících na jednotlivé nástroje.

ANNOTATION OF DIPLOMA WORK

Rentka, J. *Hot Bending Analysis of Steel Tubes*. Ostrava: Faculty of mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 90 s.

Diplomate work, director : prof. Ing.Hrubý, J.CSc.

In diploma work it's introducing the technology of pipe bending, schematics assemble particular tools. Possibilities calculation necessary force for bend, and characteristics bends. On two measurements piping It's perform the analysis force effects on individual tools.

Seznam použitého značení a zkratk	8
1 Rozbor technologií ohýbání ocelových trubek za tepla	11
1.1 Kompresní ohýbání	11
1.2 Rotační tažné ohýbání.....	12
1.3 Rotační tažné ohýbání s trnem	14
1.4 Příčiny nevhodných ohybů a jejich odstranění pro rotační tažení s/bez trnu.....	17
1.5 Tlačné ohýbání.....	17
1.6 Zakružovací technologie	18
1.7 Ohýbání ocelových trubek pomocí nízko tavitelných slitin (TMA).....	19
1.8 Ohýbání ocelových trubek pomocí vnitřního media	20
1.9 Laserové ohýbání trubek	21
1.10 Ruční ohýbání	22
1.11 Ohýbání za tepla	22
2 Metody predikce tvářecích sil ohýbání trubek za tepla	26
2.1 Metoda konečných prvků MKP	26
2.1.1 Rovnice rovnováhy	29
2.1.2 Rovnice geometrické	30
2.1.3 Fyzikální vztahy.....	30
2.2 Neutrální osa.....	31
2.3 Ovalita	31
2.4 Osové napětí.....	34
2.5 Tangenciální napětí.....	36
2.6 Kombinované napětí	36
2.7 Odpružení	38
2.8 Minimální poloměr ohybu.....	39
2.9 Maximální poloměr ohybu	40
2.10 Určení rozměrových vlastností zkoumané trubky	40
2.11 Analytická metoda výpočtu parametrů materiálu	41

2.12	Analytická metoda výpočtu parametrů polotovaru	42
2.13	Analytická metoda výpočtů technologických parametrů	43
3	Sestavení konstitutivní matice a modelu procesu ohýbání	46
3.1	Software	46
3.1.1	Pro/Engineer.....	46
3.1.2	Qform 3D.....	47
3.2	STEP – STP	50
3.3	Výběr trubek vhodných pro analýzu	50
3.4	Poloměr ohybu trubek.....	51
3.5	Volba materiálu pro analýzu	51
3.6	Rychlost posuvu trubky do ohybu.....	52
3.7	Akceptované úpravy modelu ohýbacího aparátu	52
3.7.1	Ohřev kladkami	52
3.7.2	Dohřev kladkami	53
3.8	Procesní model ohýbacího aparátu	53
3.9	Materiálový reprezentant - 12 040	56
3.10	Konstitutivní matice přetvárných odporů	60
3.11	Matice tepelně závislých parametrů	60
4	Analýza technologie ohýbání trubek pro materiálový reprezentant	62
4.1	Schéma rozmístění nástrojů a jejich orientace	62
4.2	Parametry nástroje Tool1	63
4.3	Parametry nástroje Tool2	64
4.4	Parametry nástroje Tool3	65
4.5	Parametry nástroje Tool4	67
4.6	Porovnání modelů ohřevu	68
4.7	Distribuce teplotního pole	69
4.8	Efektivní deformace	70
4.9	Přetvárný odpor	71
4.10	Střední napětí	72
4.11	Deformace trubky	73

5	Diskuze dosažených výsledků	74
6	Seznam použité literatury	76
7	Seznam obrázků	80
8	Seznam grafů	82
9	Seznam tabulek	83
10	Přílohy	85
10.1	Teplotní pole při první verzi výpočtu pro 406-45	85
10.2	Užívané termíny v oblasti ohýbání trubek	86
10.3	Základní typy maziva pro ohýbání s trnem	89
10.4	Typy trnů	90

Seznam použitého značení a zkratk

Symbol	Význam	Použité jednotky
λ	Tepelná vodivost	[$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
c	Měrná tepelná kapacita	[$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ρ	Hustota	[$\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
α	Teplotní roztažnost	[K^{-1}]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Poměrné prodloužení	[-]
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	Zkos	[$^\circ$]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Napětí v osách	[MPa]
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Napětí v rovinách	[MPa]
σ	Napětí	[MPa]
E	Youngův modul	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
C_o, o	Procentuální ovalita	[%]
C_t	Ztenčení	[%]
C_{th}	Ztlustění	[%]
t	Tloušťka trubky	[mm]
t_{\max}	Maximální tloušťka trubky	[mm]
t_{\min}	Minimální tloušťka trubky	[mm]
D, D_o	Průměr trubky	[mm]

Symbol	Význam	Použité jednotky
D_i	Vnitřní průměr trubky	[mm]
D_{max}	Maximální průměr trubky	[mm]
D_{min}	Minimální průměr trubky	[mm]
R_B	Poloměr ohybu	[mm]
P	Tlak	[MPa]
k_p	Poddajnost trubky	[-]
F	síla	[N]
M	Moment	[N·mm]
Φ	Obvodový úhel	[°]
δ	Úhel odpružení	[°]
I	Moment setrvačnosti	[mm ⁴]
J	Polární moment	[mm ³]
A	Redukovaná tloušťka stěny	[mm]
T	Smyková síla v geometrickém středu	[N]
l_m	Vzdálenost ohýbacích hran	[mm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
k	Součinitel	[-]
x	koeficient pro stanovení posunutí neutrální vrstvy	
R	Minimální poloměr ohybu	[mm]
e	Deformace	[1]
\dot{e}	Rychlost deformace	[1/s]
σ_p	Přetvárný odpor	[MPa]
C	Konstanta pevnosti	[MPa]

Symbol	Význam	Použité jednotky
n	Exponent zpevnění	[1]
Δr	Změna ovality	[mm]
r	Poloměr středního vlákna prstence	[mm]
W	Ohybový modul	[mm ³]
J	Moment setrvačnosti prstence	[mm ⁴]
Y	Vyložení ohýbací kladky	[mm]
$M_{o,pl}$	Moment ohybu s odpružením	[N·m]
L_{min}	Vzdálenost ohýbací kladky od induktoru	[mm]
R_n	Poloměr ohybu při úvaze s odpružením	[mm]
F_{vkl}	Přítlačná síla vodící kladky	[MN]
F_{okl}	Přítlačná síla ohýbací kladky	[MN]
F_{tlzr}	Síla tlačného zařízení	[MN]
WF	Stěnový faktor	[-]

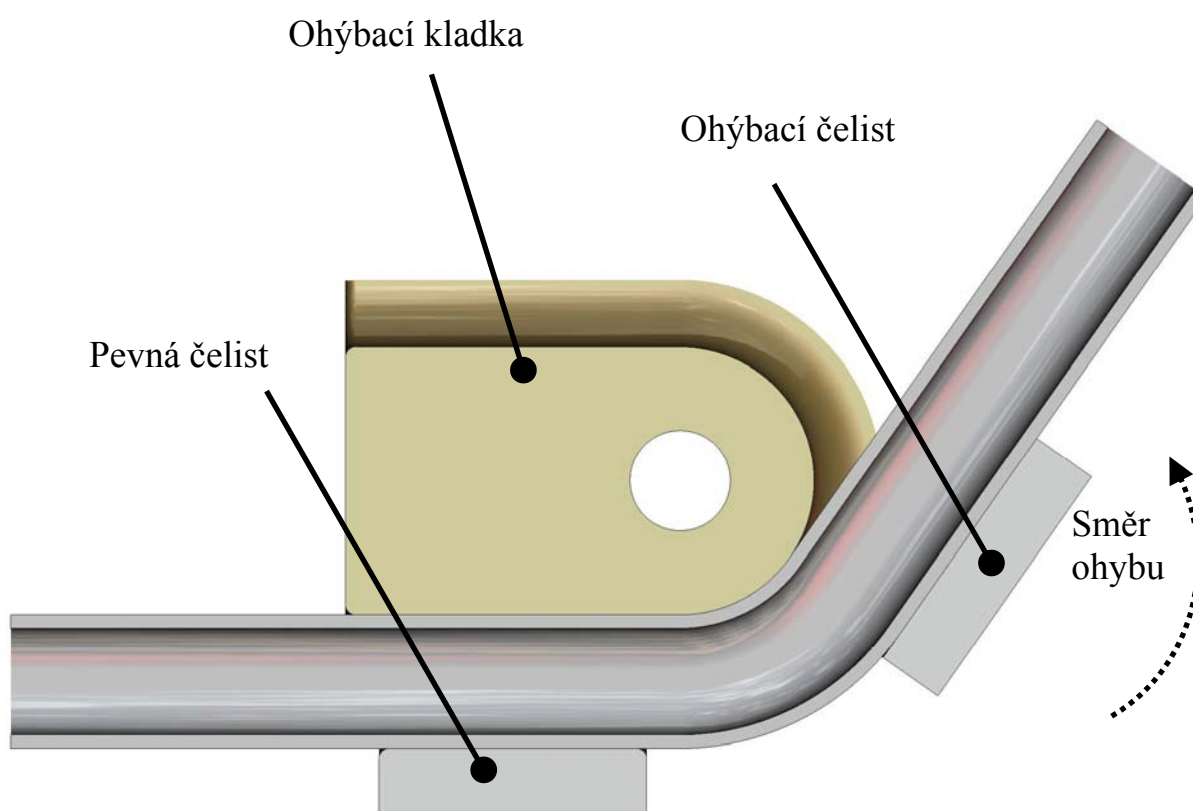
1 Rozbor technologií ohýbání ocelových trubek za tepla

- Technologie ohýbání za tepla jsou v drtivé většině používány i pro ohýbání za studena. Zaměříme se tedy na metody ohýbání obecně.
- Pro použití daných metod za tepla závisí na několika okolnostech, jako je teplota ohřevu, rozměry ohybu, rozměry ohýbané trubky atd.

1.1 Kompresní ohýbání

[28]

- Tato metoda patří mezi rozšířené v podnicích.
- Tento typ je předchůdce rotačního tažného ohýbacího nástroje.
- Ohýbací kladka je pevně uchycena. Pevná čelist svírá trubku a je pevně spojena s ohýbací kladkou. Rotací ohýbací kladky ohýbáme trubku podle ohýbací kladky.

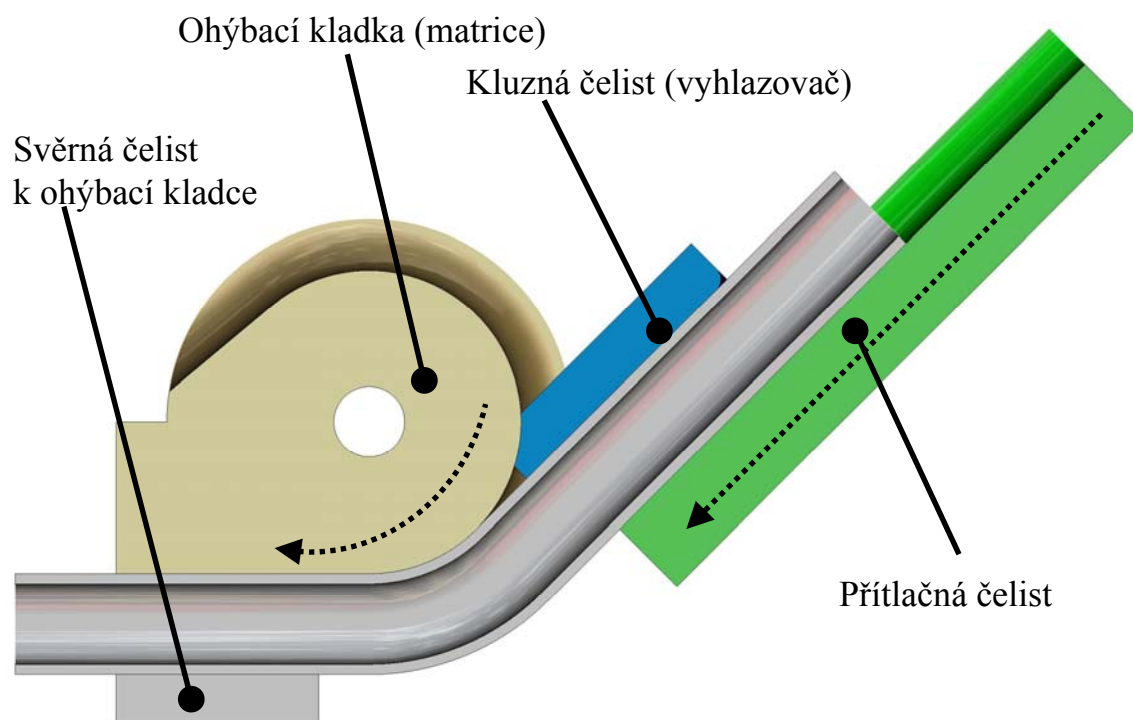


Obr. 1: Schéma kompresního ohýbání

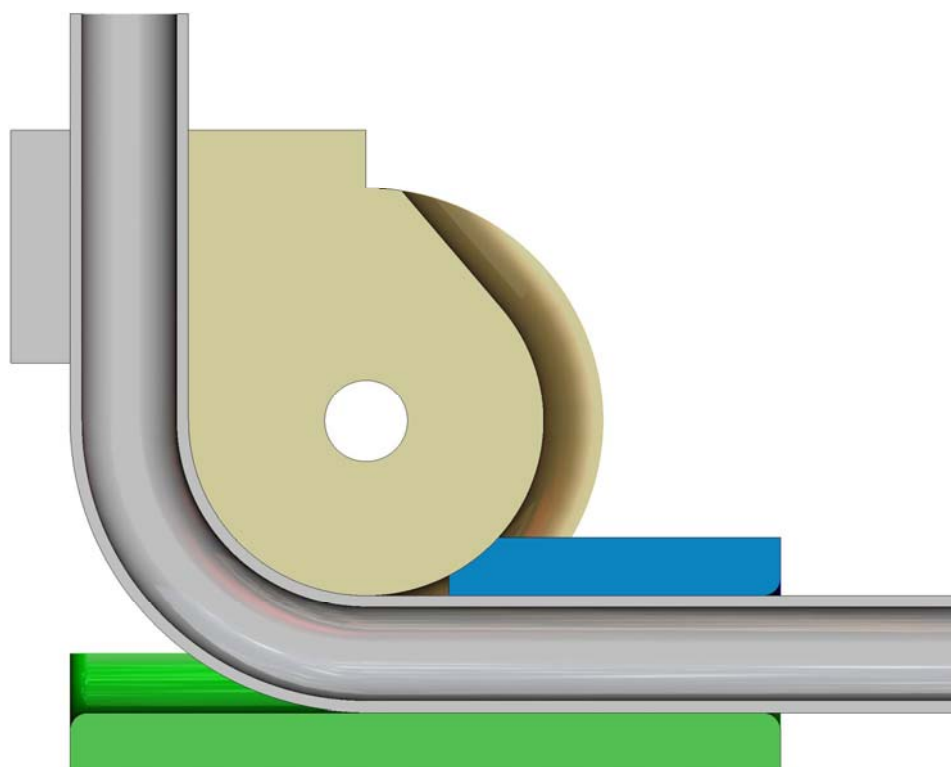
1.2 Rotační tažné ohýbání

[28]

- Jedná se o velmi často používanou metodu ohýbání trubek. Z této metody vychází následující typ ohýbání.
- Ohýbací kladka je upevněna čepem, kolem kterého otáčíme ohýbací kladkou. Ohýbaná trubka je pevně uchycena svěrnou čelistí k ohýbací kladce tak, aby nedošlo k jejímu proklouznutí.
- Musíme mít na zřeteli, že příliš velký svěrný tlak čelisti může trubku zdeformovat. Provádíme proto úpravu povrchu na ohýbací kladce a svěrné čelisti tak, abychom zvětšily tření mezi jednotlivými komponenty.
- Funkční plochy nástroje musí být hladké, aby nedošlo znehodnocení povrchu ohýbané trubky.
- Maximální poloměr ohybu je až 180° .
- Na tomto nástroji není možno vytvářet několika násobné ohyby ihned za sebou, musíme mít určitou délku rovné trubky, abychom ji mohly upnout.
- Přítlačná čelist vyvíjí stálý tlak na trubku v tangenci (funkčním bodě) kde vzniká ohyb. Její délka závisí na stupni ohybu (minimální vzdálenost mezi dvěma ohyby)části, která je ohýbána.
- Vlastnosti kluzné čelisti (vyhlazovač), svěrné čelisti a přítlačné čelisti jsou stejné jako u typu 1.3 Rotační tažné ohýbání s trnem



Obr. 2: Schéma rotačního tažného ohýbání

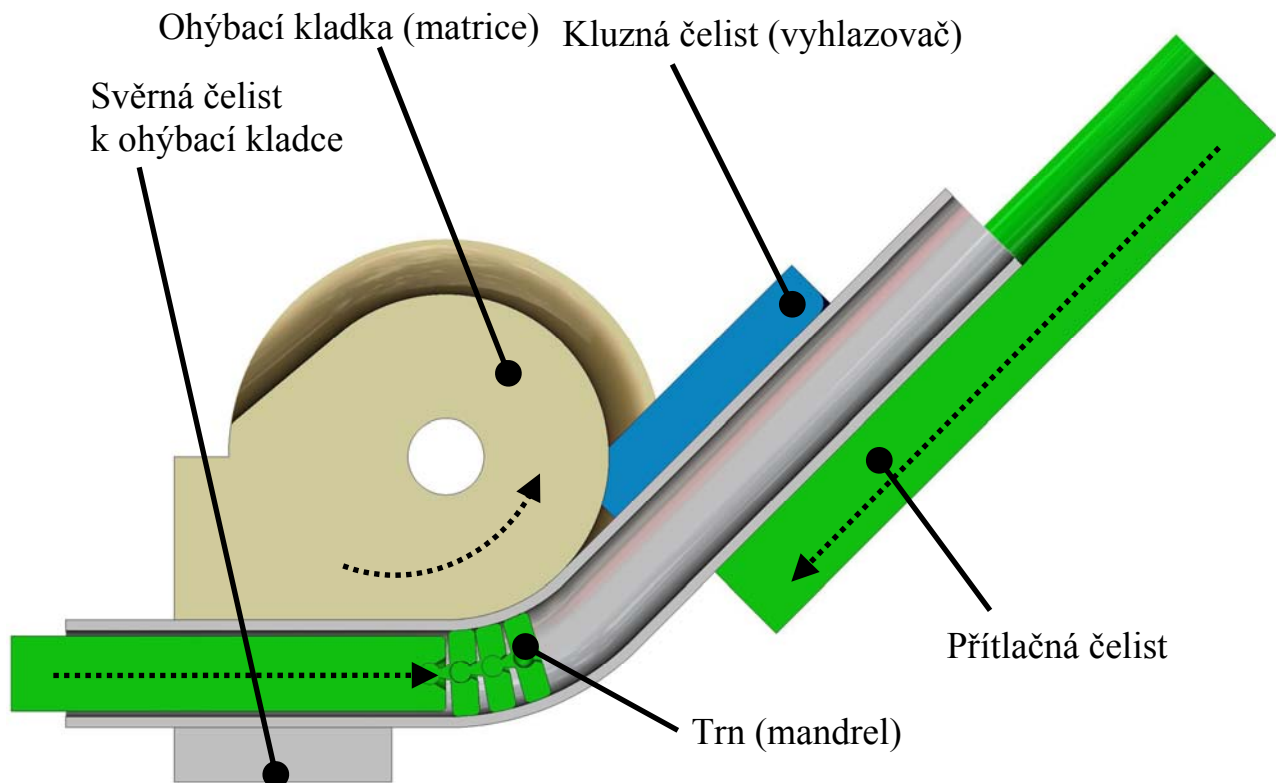


Obr. 3: Poloha při ohýbání 90° úhlu

1.3 Rotační tažné ohýbání s trnem

[30],[32]

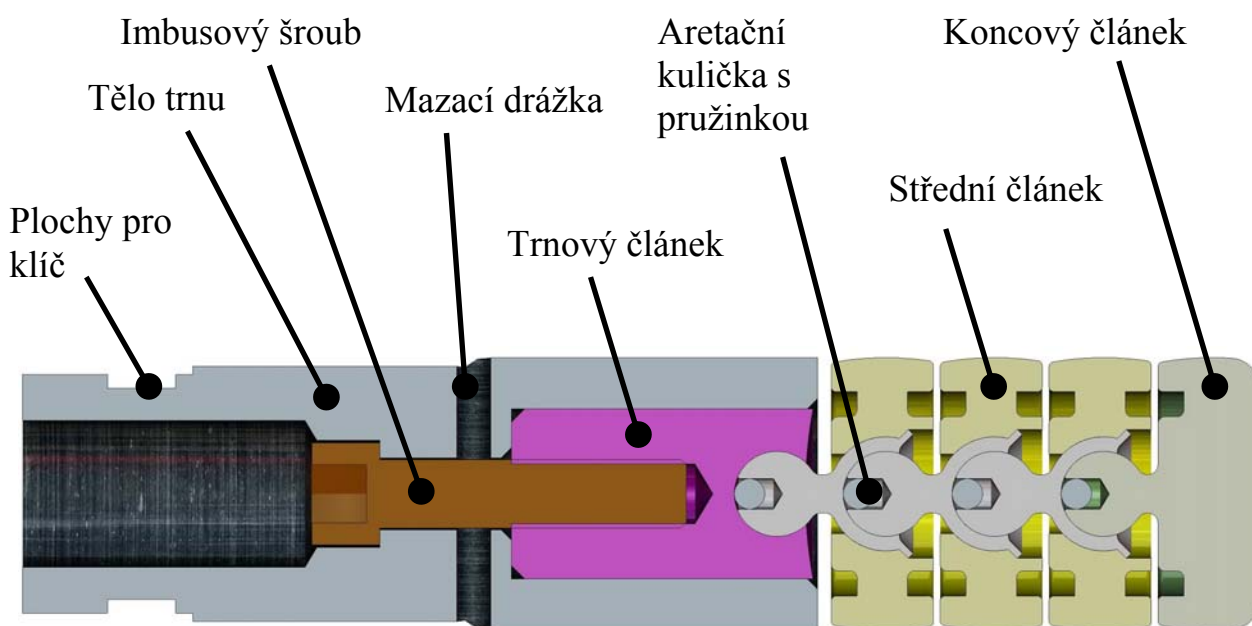
- Kluzná čelist má podobný význam jako trn (mandrel), za její pomoci se snažíme vyhladit vrásky, které se tvoří na vnitřní straně ohybu.
- Provedení kluzné čelisti může být zhotoveno jako jednolitý nástroj, nebo nástroj s výměnnou vložkou, toto provedení je vhodné u objemů velké produkce. Podle provedení je dělíme: výměnné vložky, čtvercové a kruhové čelisti.
- Při ohýbání přesných trubek nemusí být nutné použití kluzné čelisti, protože kvalita a profil trubky by měla dovolit dosáhnout ohybu bez zvětšeného tření mezi ohýbací kladkou a trubkou a kvalita ohybu by měla být dostačující.
- Velmi důležitým faktorem pro správné fungování kluzné čelisti je materiál, z kterého je vyroben. Pro ohýbání trubek z hliníku, mědi a měkké oceli se používají ocelové kluzné čelisti, zatímco pro nerezové, Inconelové a titanové trubky se užívají kluzné čelisti z Ampca.
- Aby se zmenšilo tření mezi kluznou čelistí a trubkou, mohou být ocelové kluzné čelisti pochromovány. Pro životnost kluzné čelisti i kvalitu ohybů je nejdůležitější její nastavení.



Obr. 4: Schéma ohýbání pomocí trnu

- Pomocný nástroj nazývaný trn, nebo je též znám pod anglickým názvem mandrel. Tento nástroj pracuje uvnitř trubky, kde je vložen. Ukotven je na konci trubky k tělesu stroje. Mezi trnem a strojem je většinou hydraulický válec, který nám trn po ohybu vytáhne.
- Trn musí být z kvalitního materiálu, na jeho tvaru a vlastnostech závisí kvalita ohybu. Trn je namáhán jak na tlak na tah. Skládá se z tyčové části, která trn vede v trubce, a segmentů které nám pomáhají tvarovat ohyb. Počet segmentů se řídí podle několika parametrů, jako jsou průměr, tloušťka stěny a úhel ohybu.
- Materiál trnu je obvykle ze stejného materiálu jako kluzná čelist.
- Trn nám zajišťuje, že nedojde k zploštění, zhroucení geometrie, či velké deformaci průměru trubky.
- Typy trnu:

- Jednoduchý trn - používá se pro silnostěnné trubky a velké poloměry ohybu.
- Jednoduchý formovaný trn - stejný jako jednoduchý trn, jen s tvarovaným koncem tak, aby přesně kopíroval poloměr ohybu, a proto poskytuje větší oporu uvnitř trubky.
- Standardní (kuličkový) trn - nejrozšířenější. Standardní trn má jednu kuličku, může jich však mít i více. Standardní trn je nejvíce odolným ze tří ohybných trnů, protože užívá největší velikost segmentů.
- Tenkostěnný trn - je vhodný pro tenkostěnné trubky (faktor stěny - WF - 65 a více). Tyto trny mají stejný typ spojovacích segmentů jako standardní trny, jen s tím rozdílem, že ty pro tenkostěnné trny, jsou o jednu velikost menší než by byly články u standardních trnů. Pevnost je obětována na úkor větší opory.
- Ultra tenkostěnný trn - se používá pro trubky s velmi tenkou stěnou. Používají stejný typ spojovacích článků jako standardní trny, ale o 2 velikosti menší



Obr. 5: Schéma trnu (mandrel)

1.4 Příčiny nevhodných ohybů a jejich odstranění pro rotační tažení s/bez trnu

[17]

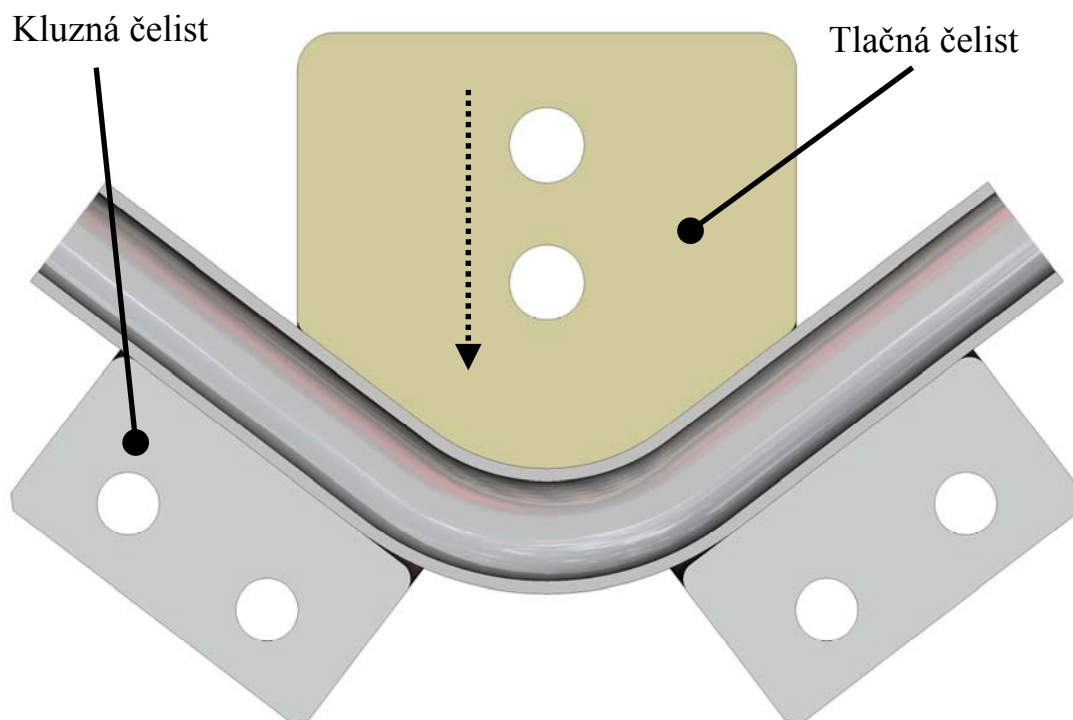
- Zlomení trubky může mít následující příčiny:
 - Materiál nemá dostatečné mechanické vlastnosti.
 - Trubka v čelistech prokluzuje. Nesprávný tlak na čelist. Zvolit různé typy povrchů pro čelist a čelist matrice.
 - Příliš velký tlak na přitlačné liště může být příčinou přílišného zadrhávání. Snižte tlak.
 - Materiál se vrásčí a začíná se zachycovat mezi segmenty trnu. Užijte tenkostěnný trn.
 - Čelist stlačuje segmenty trnu. Snižte tlak na čelist.
 - Nedostatečné mazání či nevhodný typ užitého lubrikantu.
 - Trn je nastaven do polohy příliš daleko za bodem ohybu.
- Zvrásnění trubky může být zapříčiněno:
 - Prokluzováním trubky v čelistech. Zvýšit tlak na čelist nebo změnit její povrch a také povrch čelisti matrice.
 - Trn je nedostatečně vysunut za bod ohybu.
 - Vyhlažovač není ve správné pozici
 - Vyhlažovač je opotřebovaný a nedosedá přesně. Poloměr ohybu vyhlažovače je stejný jako poloměr ohybu matrice?
 - Příliš velká tolerance mezi trnem a trubkou. Zvolit větší velikost trnu.
 - Nedostatečný tlak na přitlačné liště. Zvýšit tlak.

1.5 Tlačné ohýbání

[30]

- Jedna ze základních metod ohýbání, vhodná pro malosériovou výrobu. Tlačná čelist je nejčastěji připevněna na hydraulickém válci, který tlačí ohýbanou trubku proti kluzným čelistím. Nebo je tlačná čelist stacionární a kluzné čelisti trubku ohýbají.

- Velkou výhodou je pořizovací cena, která je nízká.

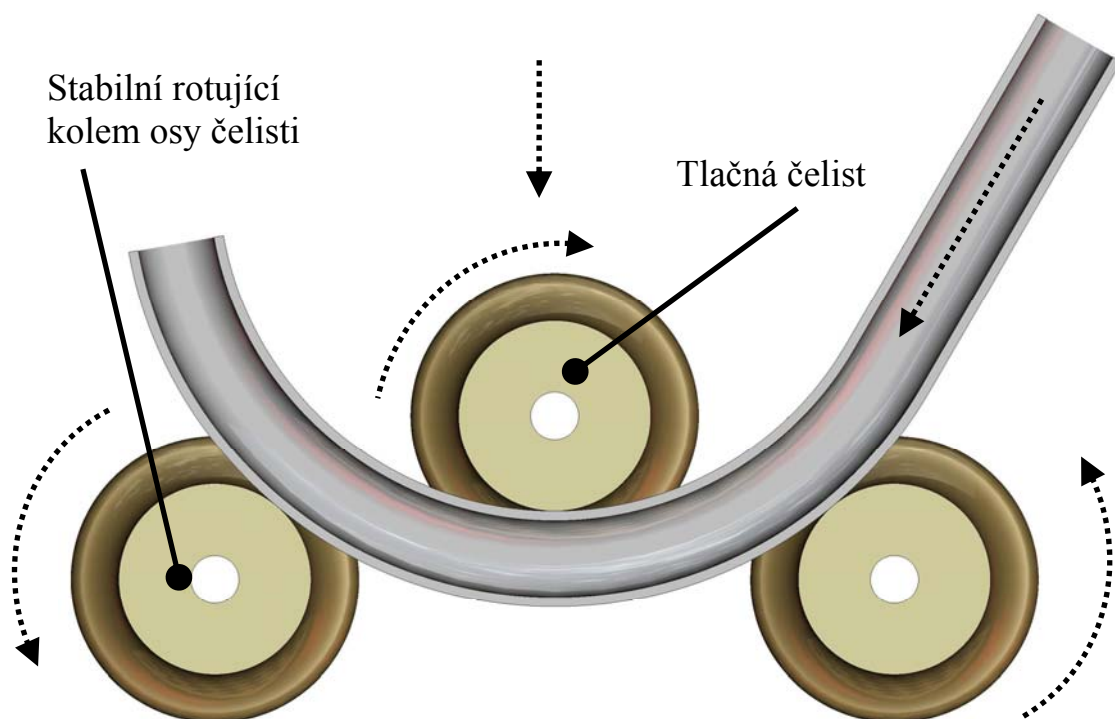


Obr. 6: Schéma tlačného ohýbání

1.6 Zakružovací technologie

[30]

- Umožňuje ohyb až 360°, je vhodná pro velké poloměry ohybu.
- Vhodné jak pro tlustostěnné tak i tenkostěnné profily, kromě trubek můžeme ohýbat také duté profily, speciální profily L, I, U a T atd.
- Tento typ nám umožňuje ohýbat do spirály.
- Všechny tři čelisti jsou poháněné (rotují), obvykle jedna čelist je výškově nastavitelná, popřípadě funguje jako tlačná.
- Umožňuje ohyby jak v horizontální tak i vertikální poloze. Kvalita ohybu je výborná. Cena nástrojů je střední.



Obr. 7: Schéma zakružovací technologie

1.7 Ohýbání ocelových trubek pomocí nízko tavitelných slitin (TMA) [19]

- Současným trendem je používání tenkostěnných trubek, tento trend nám velmi komplikuje ohýbání trubek, proto se vývojáři snaží přijít s inovativními návrhy. Jedním z nápadů je použití nízko tavitelných slitin, nebo známé pod anglickým názvem **Tube Bending Alloy - TBA**.
- Princip je zcela jednoduchý, slitina o nižším bodu tavení se použije na vyplnění obsahu ohýbané trubky. Dalo by se říci, že její funkce je téměř stejná jako u trnu. Velkou výhodou je že použitou slitinu můžeme opakovaně používat. V případě trnů je nutné pro každý průměr vnitřní trubky mít i příslušný trn.
- Slitina nám zabraňuje tvorbě smyček či zvrásnění.
- Druh slitiny je závislý na druhu ohýbaného materiálu, jeho fyzikálních, a mechanických vlastnostech.

- Nevýhodou je potřeba větších ohýbacích sil. Trubky pro ohýbání touto technologií je doporučeno mít ve stavu žíhaném.
- Postup ohýbání pomocí TBA:
 - Trubka musí být čistá, suchá
 - Na vnitřek trubky se použije mazivo – silikonové oleje, minerální oleje, nedetergentní oleje – slitina (TBA) nesmí přilnout na vnitřní povrch trubky
 - Uzavřeme jeden konec trubky
 - Trubku plníme TBA mírně skloněnou, abychom předešly tvorbě vzduchových kapes
 - Necháme zchladnout. Odstraníme ucpávku
 - Ohýbáme zvolna rovnoměrným tlakem, tímto dosáhneme nejlepších výsledků.
 - Trubku zahřejeme a vylijeme TBA
 - Vhodným přípravkem odstraníme olejový film z vnitřního povrchu trubky

1.8 Ohýbání ocelových trubek pomocí vnitřního media

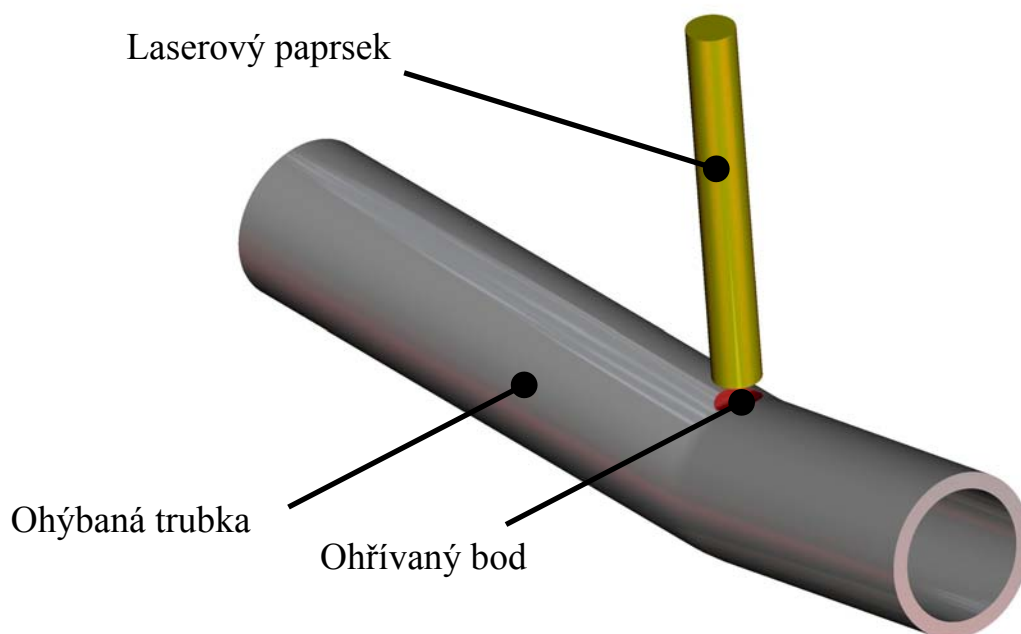
[25]

- Technologie je podobná jako při používání TMA.
- TMA zde nahrazují media jako je mýdelná suspenze (ohýbání trubek pro výrobu trumpet) atd.
- Nebo pro ohýbání trubek v instalatérské praxi se používá písek. Pokud budeme uvažovat o ohýbání za tepla je vhodné použití písku pouze u materiálu, které stačí ohřát na nízké teploty. Při zahřátí na vyšší teplotu dojde k odpaření vlhkosti z písku a objemové expanzi.

1.9 Laserové ohýbání trubek

[18]

- Princip laserového ohýbání trubek je založen na jednoduchém principu ohřevu materiálu a jeho deformaci bez použití nástrojů, a vnějších sil.
- Jedná se o poměrně novou metodu, kde její mechanismy jsou pořád zkoumány za účelem zlepšení kvality ohybu.
- Mezi výhody laserového ohýbání patří nízká cena pro malosériové ohyby, odpadají nám pořizovací náklady na nástroje. Výsledky zachování ovality jsou velmi dobré. S použitím číslicově řízených strojů je velmi jednoduchá sériová výroba. Trubky ohýbané touto technologií mají vlastnosti blízké materiálům, které jsou ohýbány konvenčními technologiemi a žíhány. Vynikající kontrola nad parametry ohýbání jako je vnesené teplo atd.
- Nevýhodou je použitelnost pro malé úhly ohybu. Příliš velký výkon laseru může roztavit stěnu trubky.



Obr. 8: Schéma laserového ohýbání

1.10 Ruční ohýbání

[29]

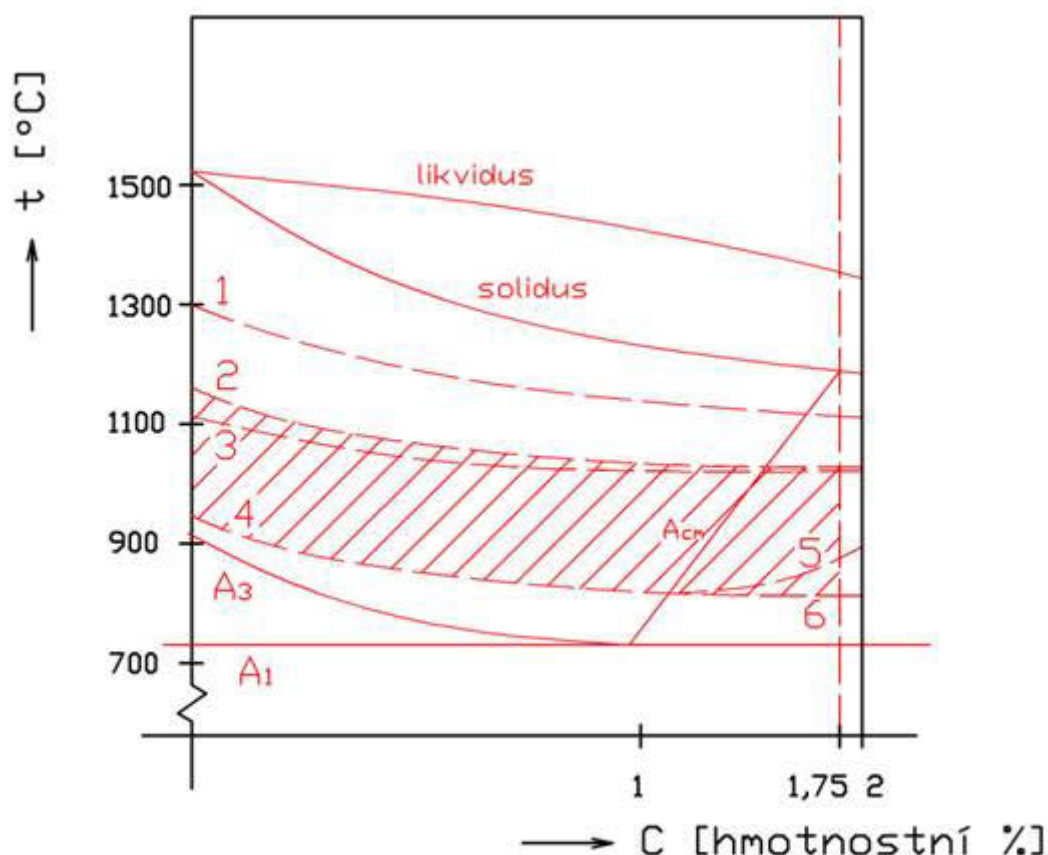
- Technologie, která se využívá pouze při ohýbání trubek malých průřezů a velkých poloměrů ohybů.
- Většinou se aplikuje na měkké měděné trubky.
- Pro ruční ohýbání se používá ohýbacích pružin, tyto pružiny existují ve dvou verzích a to vnitřní a vnější ohýbací pružiny. Jejich funkcí je chránit trubku před změnou průřezu
- Povoleno je ohýbat trubky, kde poloměr ohybu je větší jak šestinásobek vnějšího průměru trubky.

1.11 Ohýbání za tepla

[26]

- Mezi velké množství výhod, které nám ohýbání za tepla přináší, musíme bezesporu vyzdvihnout možnost ohýbání malých poloměru ohybu bez vyšších lokálních deformací materiálu.
- V procesu ohýbání za tepla dochází k zahřátí části ohýbaného materiálu na vhodnou teplotu (teplota ohřevu se liší pro každý materiál).
- Materiál prochází středem elektrické cívky, cívka produkuje silné magnetické pole indukující z elektrického proudu v ní procházející.
- V materiálu dochází k lokálnímu zahřátí, materiál se za cívkou ohýbá do požadovaného tvaru, většinou začátek trubky pevně uchycen k ramenu, které je nastaveno na požadovaný poloměr ohybu. Toto rameno je nejčastěji poháněno hydraulicky a provádí požadovaný ohyb.
- Při použití indukčního ohřevu můžeme velmi dobře kontrolovat teplotu ohřevu. Doporučená teplota ohřevu je pro uhlíkové oceli v rozpětí $800 \div 1080^{\circ}\text{C}$. Přičemž maximální teplota ohřevu je $150 \div 200^{\circ}\text{C}$ pod teplotou solidu. Pro materiály s tvářenou strukturou platí doporučená křivka ohřevu 3 na obr. 9. Doba ohřevu musí být co nejkratší, aby nedošlo k narušení povrchové i vnitřní jakosti

materiálu. Čím je doba ohřevu delší, tím více se nám projevují negativní vlivy ohřevu, jako je oduhličením, opal, hrubnutí zrna atd.

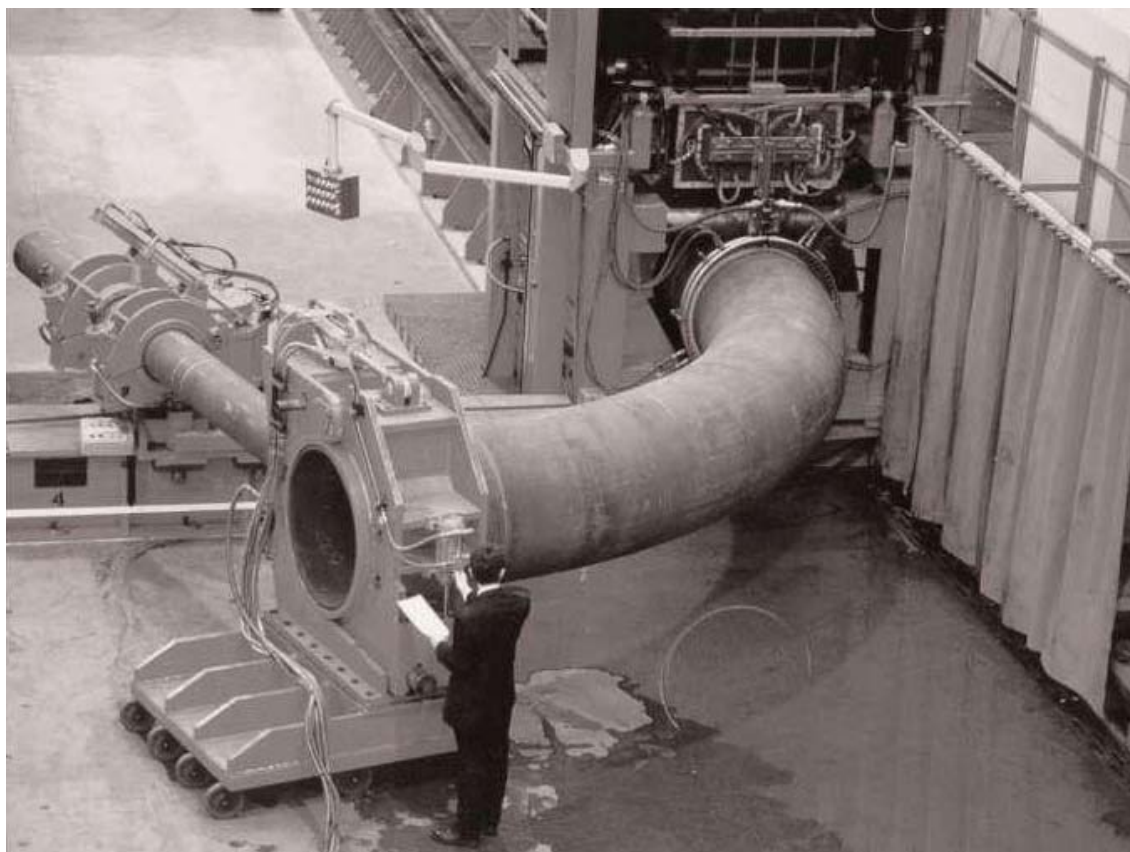


Obr. 9: Doporučené teploty ohřevu

– Na dobu ohřevu mají vliv tyto parametry:

- Tepelná vodivost – $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ – vyjadřuje schopnost přestupu tepla z povrchu do jádra ohřívaného materiálu
- Měrná tepelná kapacita – $c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$ – vypovídá o množství potřebného tepla, které musíme vynaložit na zvýšení stávající teploty na jednotku objemu materiálu. Čím vyšší hodnota, tím více musíme vynaložit energie.
- Hustota kovu – $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^{-3}} \right]$

- Teplotní roztažnost- $\alpha [K^{-1}]$ - vyšší hodnota teplotní roztažnosti nám zvyšuje tepelné pnutí uvnitř materiálu. Lze omezit snížením rychlosti ohřevu
 - Plasticita kovů – vzrůstá s teplotou materiálu (klesá modul pružnosti E). Většina ocelí přechází při cca 550°C do plastického stavu, vyšší plasticita snižuje tepelné napětí, můžeme tedy zvětšit rychlost ohřevu.
- Dnešní moderní stroje nám umožňují elektronicky sledovat celý proces ohýbání, jeho záznam v elektronické podobě na pevný či síťový disk. Takto uložené záznamy můžeme analyzovat a kontrolovat stálost kvality prováděných ohybů.
 - Ihned za ohřevem zpravidla následuje chlazení, tím je zajištěno, že ohyb bude probíhat v pásmu mezi ohřevem a chlazením.
 - Chlazení bývá provedeno pomocí vodní sprchy, proudem vzduchu, nebo pomocí okolní atmosféry.
 - Další výhodou této technologie je potřeba méně výkonných strojů, při ohýbání za tepla potřebujeme stroje, které nám vyvinou a vydrží až o 2/3 vyšší síly, než oři ohýbání za tepla. Ohýbat za tepla můžeme i materiály, které by nebylo možné ohýbat za studena (extra houževnaté materiály).
 - Při ohýbání za tepla dosahujeme lepší kvality povrchu bez použití speciálních nástrojů.
 - Vhodnost aplikace ohýbání za tepla není bohužel vhodná pro všechny materiály. Tato metoda je také pomalejší a nákladnější. Z toho vyplývá také intenzivnější prosazování ohýbání za studena.



Obr. 10: Ukázka ohýbacího aparátu pro velké ohyby za tepla

2 Metody predikce tvářecích sil ohýbání trubek za tepla

2.1 Metoda konečných prvků MKP

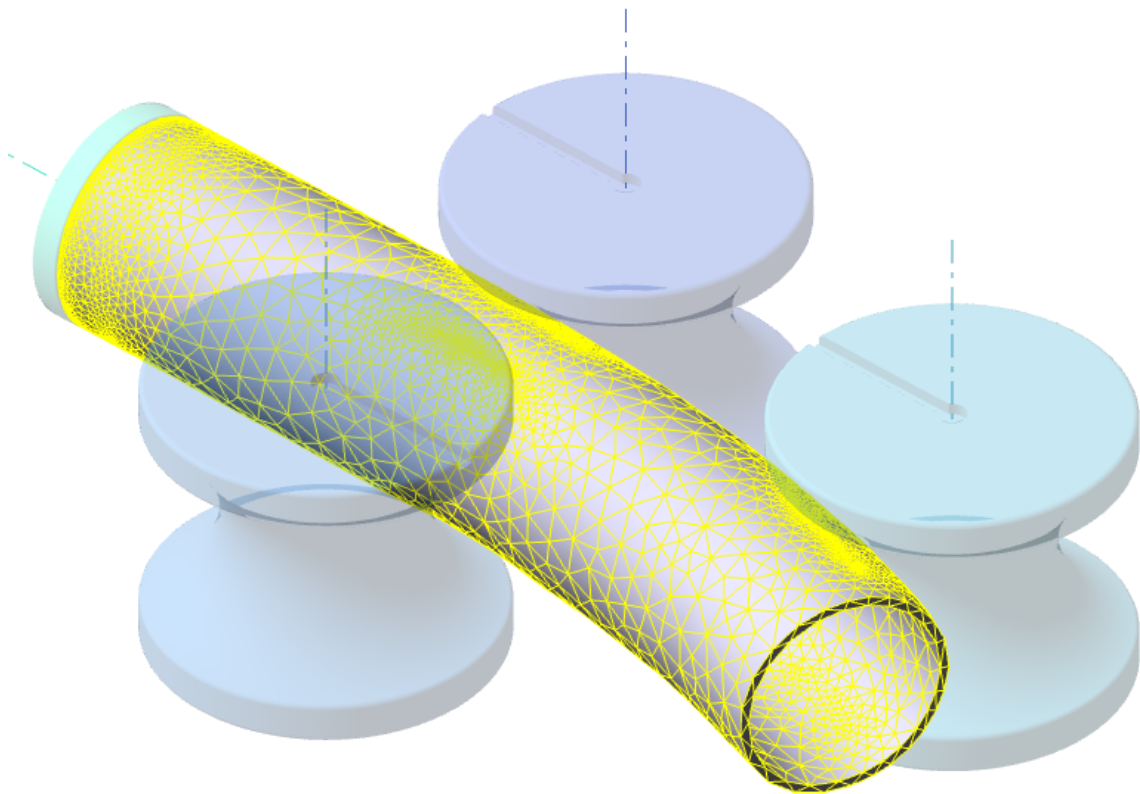
[33], [34],

[35], [36]

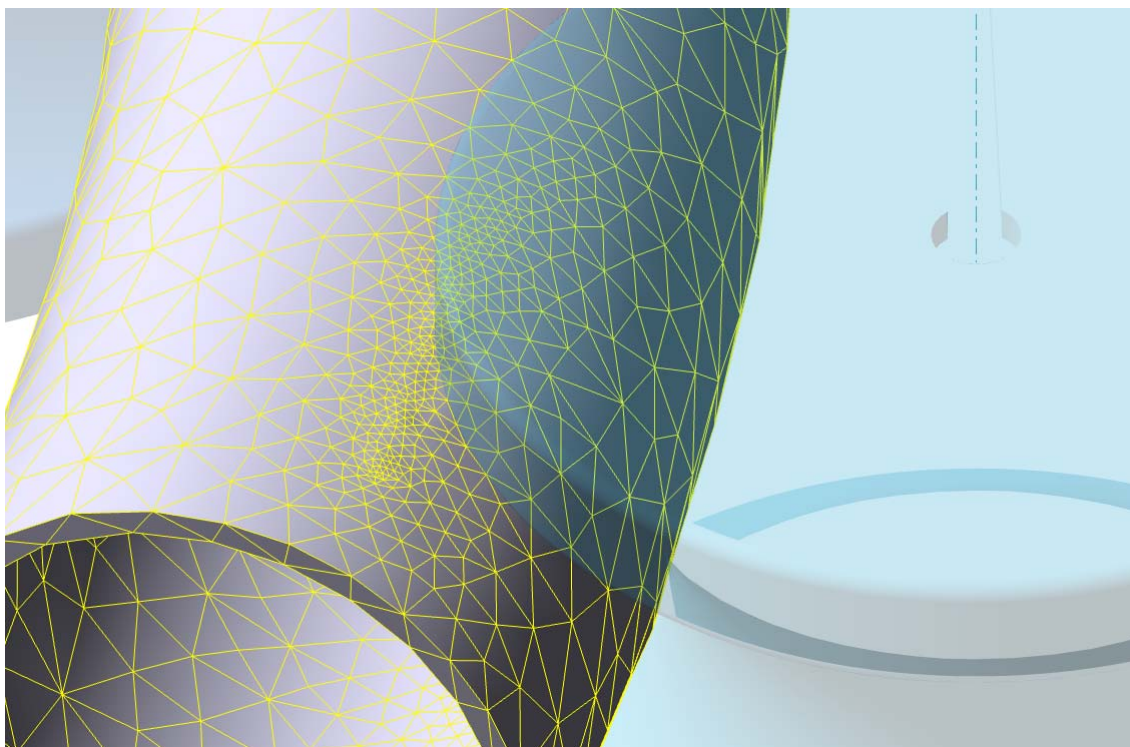
- Metoda konečných prvků – MKP, nebo také nazývána podle anglického originálu Finite Element Method bývá tak označována jako FEM.
- Tato metoda řešení našla uplatnění v mnoha vědních oborech jako je fyzika, statika, dynamika, elektrostatika atd. FEM řeší tyto problémy soustavou lineárních rovnic, což je zefektivněno použitím výpočetní techniky.
- Prvky používané v FEM :
 - Diskretizace
 - Snažíme se model rozdělit na menší části, které jsou matematicky snadno popsatelné, a mají konečný počet. Jako prvky takto vytvořené používáme nejjednodušší prvky (trojúhelník, obdélník, čtverec atd.). Rozdělením tělesa na popsané prvky dostáváme tzv. síť. Hustota vytvořené sítě nám může mít vypovídající schopnost o kvalitě výsledků dosažených při výpočtu.
 - Existují algoritmy pro automatické vytvoření sítí. Tyto algoritmy jsou schopné se adaptovat na nové skutečnosti, které vyvstanou během zkoumaného procesu. Hustotu vytvořené sítě můžeme upravovat pomocí nastavení v generátoru, musíme mít však na paměti že hustější (detailnější) síť nám prodlužuje dobu výpočtu. Je proto vhodné volit optimální nastavení. Na obr. 11 níže je vidět vytvořenou síť na

mnou zkoumaném prvku, na obrázku je pozorovatelné zhuštění sítě (obr. 12 - detail), v místě kde dochází k dotykům ohýbacích kladek a trubky.

- Ruční navrhování sítí je v dnešní době neefektivní metoda, vhodná při jednodušších úlohách. Mnohé softwary nám umožňují pouze použití generovaných sítí.



Obr. 11: Ukázka automaticky generované sítě v MKP



Obr. 12: Detail vytvořené sítě, v bodě dotyku dochází k automatickému zhuštění sítě.

▪Aproximace

- Jedná se aproximační funkci, ve které jsou popsány fyzikální vlastnosti tělesa (posunutí, napětí, teplota). Aproximační funkce pro teplotu charakterizující její rozložení na obdélníkové desce je vyjádřena jako, neznámou funkci nahradíme v jednotlivých uzlech aproximační funkcí, která musí mít tolik členů kolik má uzlů. Pro trojúhelníkový prvek je to tedy polynom třetího stupně.

▪Interpolace

- Postup, jejímž řešením dostáváme přibližnou hodnotu funkce mezi dvěma známými body $f(x); x \in \langle a, b \rangle$, kde známé body jsou a, b.

▪Extrapolace

- Po vyřešení funkce dostáváme hodnotu, za polem hodnot, které jsou určeny.

- Na geometrickém tělese (krychle) je vytvořena síť, a je dán tak předpoklad, že těleso je rozděleno do konečného počtu prvků. Tělesu jsou dány jeho materiálové vlastnosti, dále jsou definovány parametry zkoumaného procesu, a další vlastnosti nutné pro správný výpočet. Budeme se zabývat přímou úlohou pružnosti
- Ze zatížení prvků vytvořených na tělese dojde v konečném důsledku k řešení řady rovnic. Víme z pružnosti, že dojde k vytvoření 15 neznámých funkcí, proměnných x, y, z . Výsledkem jsou tedy rovnice pro :
 - Posuvy v osách - u, v, w
 - Přetvoření
 - Poměrná prodloužení $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$
 - Zkos pravoúhlých stěn $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
 - Napětí
 - V osách $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$
 - V rovinách $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$
- Tyto rovnice jsou dále vázány na podmínky obecných rovnic, které musí být splněny ve vnitřní oblasti tělesa. Mezi vnitřní podmínky patří rovnice rovnováhy, geometrické a fyzikální rovnice.

2.1.1 Rovnice rovnováhy

- Jsou podmínkami rovnováhy základního vnitřního elementu, na který kromě složek napětí, působí také vnější objemová síla. Představují vzájemnou vnitřní vazbu mezi složkami napětí, které musí být splněny bez ohledu na typ materiálu, velikost deformací atd.
- Uvedené rovnice jsou pro případ statického zatěžování

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + o_x &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + o_y &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + o_z &= 0
\end{aligned}
\tag{1}$$

2.1.2 Rovnice geometrické

- Vytvářejí vazbu mezi složkami posuvů a přetvoření, uvedené jsou pouze pro malá přetvoření v řádu 10^{-2} a menším

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{2}$$

$$\begin{aligned}
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
\gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\
\gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}
\end{aligned}
\tag{3}$$

2.1.3 Fyzikální vztahy

- Je zde vyjádřen vztah mezi deformací a napjatostí. V oblasti lineárně pružného materiálu je vyjádřen pomocí Hookova zákona $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Jeho vlastnosti jsou určeny dvěma nezávislými konstantami a to modulem pružnosti v tahu – E - Youngův modul pružnosti, a Poissonovým číslem μ .
- Modul pružnosti ve smyku není nezávislý, je vyjádřen rovnicí

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4)$$

2.2 Neutrální osa

[37]

- Při ohybu nastává deformace průřezu, viz bod ovalita.
- Větší průřezy jsou deformovány více, než průřezy menší.
- Kolem střední části průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová a tlaková napětí malá. Dosahují hodnot nižších než je mez kluzu u ohýbaného materiálu. V přechodu mezi těmito dvěma pásy jsou vlákna bez napětí a deformace.
- Spojnice těchto vláken tvoří takzvanou neutrální osu. Tj. osu, ve které při ohýbání nenastává ani prodlužování či zkracování. Nepůsobí tedy v ní žádná napětí.
- Neutrální osa je před započítím ohýbání ve středu průřezu. Při ohýbání se osa posunuje směrem k vnitřní straně ohybu, není tedy totožná s osou těžiště materiálu, který ohýbáme.
- Z délky neutrální osy v ohýbaných úsecích a úsecích rovných můžeme zjistit celkovou délku polotovaru nutnou k provedení ohybu.

2.3 Ovalita

[20]

- Ohýbání trubek patří mezi základní stavební prvky moderních konstrukcí. Často je jich využíváno v architektonickém oboru, ale i v chemickém, automobilním, leteckém průmyslu atd.
- Při určování kvality provedeného ohybu sledujeme proměnné, jako jsou ovalita, úhel odpružení a tloušťka stěny. Tyto vyjmenované proměnné jsou závislé na průměru trubky, tloušťce stěny trubky a poloměru ohybu.

- Při ohýbání trubek se mimo jiné snažíme zajistit konstantní průřez trubky, tedy co nejmenší hodnoty ovality. Definujeme tedy některé pojmy s ní souvisele:

▪ Procentuální ovalita

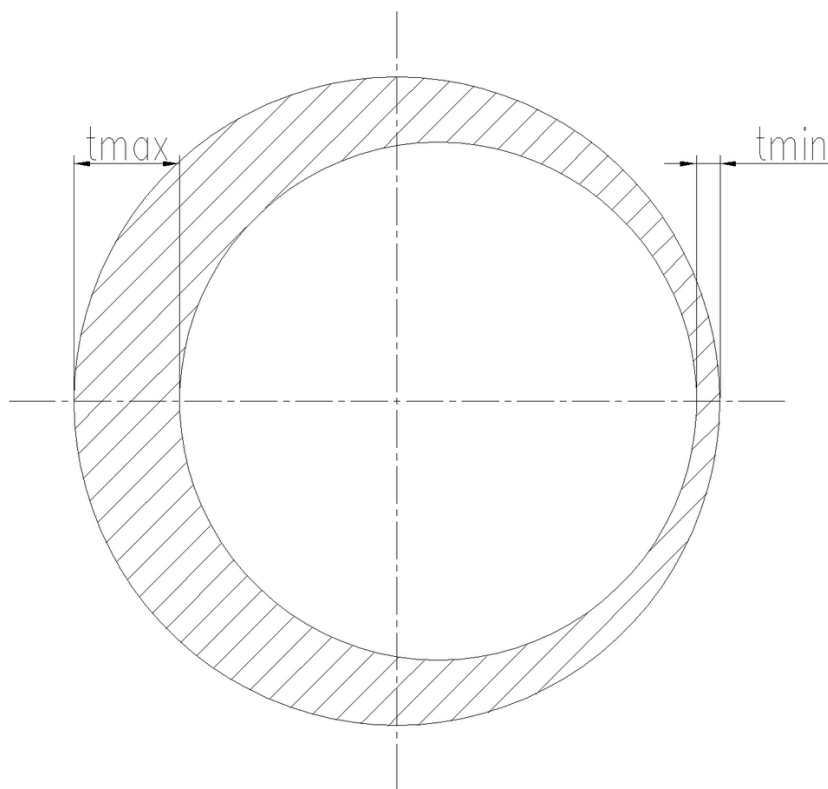
$$\bullet C_o = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{\frac{(D_{\max} + D_{\min})}{2}} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

▪ Ztenčení

$$\bullet C_t = \frac{(t - t_{\min})}{T} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

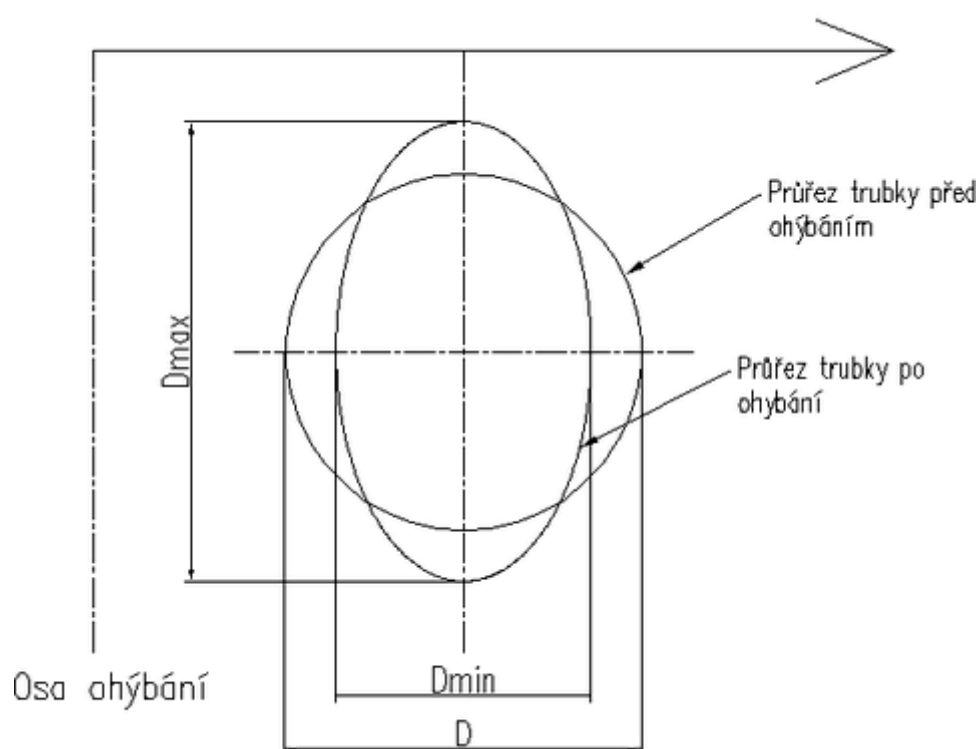
▪ Ztlustění

$$\bullet C_{th} = \frac{(t_{\max} - t)}{t} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$



Obr. 13: Ukázka změny průřezu trubky po ohybu

- Tvorbu ovality můžeme zmírnit některými opatřeními, či změnou technologie ohýbání. Nelze ji ale zabránit, ovalita bude vždy přítomna, jsme tedy schopni omezit její velikost.
- Na vnitřní ploše ohýbaného poloměru působí tlakové napětí, a na vnější ploše působí tahová napětí. Nejčastěji se ovalita projeví zploštěním trubky v rovině ohybu, jako na obr. Ovalita. Trubka změni svůj tvar vlivem působení tahových napětí. Tahová napětí nám ztenčí stěnu trubky, při eskalaci tahových napětí nad mez dovolených napětí dojde k porušení stěny, prasknutí.
- Při kompresním ohýbání může i vlivem špatně nastavených parametrů technologie dojít k výraznému prodloužení trubky.
- Kromě ovality zaviněné převážně vysokým stupněm tahových napětí může dojít také k další vadě trubky a to krčení či zvrásnění vnitřní plochy ohybu. Tlaková napětí se koncentrují a tloušťka materiálu v tomto místě se zvětšuje.



Obr. 14: Ovalita

- Ovalizaci probíhající změnou průřezu při ohýbání, ovlivňuje napětí a tuhost. Poddajnost trubky by se mohla vyjádřit pomocí k_p . Hodnota k_p je proměnná a její výpočet je níže. Pro trubku rovnou je hodnota $k_p = 1$. Pro trubku ohýbanou:

$$k_p = \frac{1.65 \cdot r^2}{R_B \cdot t} \left[\frac{1}{1 + 6 \cdot \frac{P \cdot r}{E \cdot t} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{r}{t}\right)^4} \cdot \sqrt[3]{\frac{R_B}{r}}} \right] \quad (8)$$

$$r = \frac{D_o - t}{2} \quad (9)$$

- R_B - poloměr ohybu
 - t - tloušťka stěny
 - P - vnitřní tlak
 - E - Youngův modul
- Často se používá vyjádření vhodnosti technologie (nebo vhodnosti stroje) pro ohýbání trubek násobností vnějšího průměru trubky. Setkáme se tak v literatuře s označením $R=5D$, $R=2D$, což znamená, že daná technologie je vhodná pro ohyby s poloměrem ohybu, který je daným násobkem vnějšího průměru trubky.

2.4 Osové napětí

[26]

- Osové napětí je zapříčiněno tečným zatížením vyvolaným při ohýbání, rovinným zatížením v případě tlaku v trubce jejím zatížením atd.

$$\sigma_{osové} = \sigma_{tahové} + \sigma_{tlakové} + \sigma_{rovinné} + \sigma_{mimorovinné} \quad (10)$$

- Tahové napětí je vyjádřeno jako tahová síla působící na průřez trubky

$$\sigma_{tahové} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_j^2)} \quad (11)$$

- F – průměrná tahová síla podél osy
 - D_o - vnější průměr trubky
 - D_i - vnitřní průměr trubky
- Vnitřní tlak vytváří síly, které se snaží trubku narovnat. Tyto síly nesmíme zanedbat, pokud ohýbáme trubku pomocí vnitřního media atd.

$$\sigma_{tlakové} = \frac{P \cdot D_i^2}{(D_o^2 - D_i^2)} \quad (12)$$

- Napětí působící rovině ale i mimo rovině nám způsobuje ovalizaci trubky a vytváří příčné nebo tangenciální napětí.

$$\sigma_{rovinné} = -\frac{M \cdot D_o}{2 \cdot I} [\sigma_{tm} + \mu \cdot \sigma_{nb}] \quad (13)$$

$$\sigma_{mimorovinné} = -\frac{M \cdot D_i}{2 \cdot I} [\sigma_{tm} - \mu \cdot \sigma_{nb}] \quad (14)$$

- M – M1 momenty působící v rovině, M2 – mimo rovině
- v rovině

$$\sigma_{tm} = \frac{\sin \phi + [(1,5 \cdot X_2 - 18,75) \cdot \sin 3\phi + 11,25 \cdot \sin 5\phi]}{X_4} \quad (15)$$

$$\sigma_{nb} = \frac{\lambda \cdot (9 \cdot X_2 \cdot \cos 2\phi + 225 \cos 4\phi)}{X_4} \quad (16)$$

- mimo rovinu

$$\sigma_{tm} = \frac{\cos \phi + [(1,5 \cdot X_2 - 18,75) \cdot \cos 3\phi + 11,25 \cdot \cos 5\phi]}{X_4} \quad (17)$$

$$\sigma_{nb} = \frac{\lambda \cdot (9 \cdot X_2 \cdot \sin 2\phi + 225 \sin 4\phi)}{X_4} \quad (18)$$

$$X_1 = 5 + 6\lambda^2 + 24\psi \quad (19)$$

$$X_2 = 17 + 600\lambda^2 + 480\psi \quad (20)$$

$$\bullet X_3 = X_1 \cdot X_2 - 6,25 \quad (21)$$

$$\bullet X_4 = (1 - \nu^2)(X_3 - 4.5X_2) \quad (22)$$

$$\bullet \phi - \text{obvodový úhel}$$

$$\bullet \lambda = \frac{t \cdot R_B}{r^2 \sqrt{1 - \nu^2}} \quad (23)$$

$$\bullet \psi = \frac{P \cdot R_B}{E \cdot r \cdot t} \quad (24)$$

$$\bullet I = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64} \quad (25)$$

2.5 Tangenciální napětí

[26]

- Tangenciální napětí je zapříčiněno ohýbacími momenty působících v hlavních rovinách, mimo rovinných momentů a vnitřního tlaku při ohýbání s mediem.

$$\blacksquare \sigma_{tečné} = \sigma_{tlakové} + \sigma_{rovinné} + \sigma_{mimorovinné} \quad (26)$$

$$\bullet \sigma_{tlakové} = P \cdot \left[\frac{D_o - 0,8(t - A)}{2(t - A)} \right] \cdot \left[\frac{0,5(2 \cdot R_B + r \cdot \sin \phi)}{R_B + r \cdot \sin \phi} \right] \quad (27)$$

$$\bullet \sigma_{rovinné} = -\frac{M \cdot D_o}{2 \cdot I} [\mu \cdot \sigma_{tm} + \sigma_{nb}] \quad (28)$$

$$\bullet \sigma_{mimorovinné} = -\frac{M \cdot D_i}{2 \cdot I} [\mu \cdot \sigma_{tm} - \sigma_{nb}] \quad (29)$$

- A – redukovaná tloušťka stěny podle ASME Code, Část 3, NB-3683-NB3686, 1986

2.6 Kombinované napětí

[26]

- Pro výpočet kombinovaného napětí použijeme uvedených vzorců pro výpočet osového, tangenciálního napětí a smykových napětí.

$$\sigma_1 = \left(\frac{\sigma_{osové} + \sigma_{tečné}}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{osové} + \sigma_{tečné}}{2} \right)^2 + \tau_{smykové}^2} \quad (30)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{radialní} \quad (31)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{\sigma_{osové} + \sigma_{tečné}}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{osové} + \sigma_{tečné}}{2} \right)^2 + \tau_{smykové}^2} \quad (32)$$

$$\bullet \tau_{smykové} = \frac{T \cdot D_o}{2 \cdot J} - \text{pro vnější plochu} \quad (33)$$

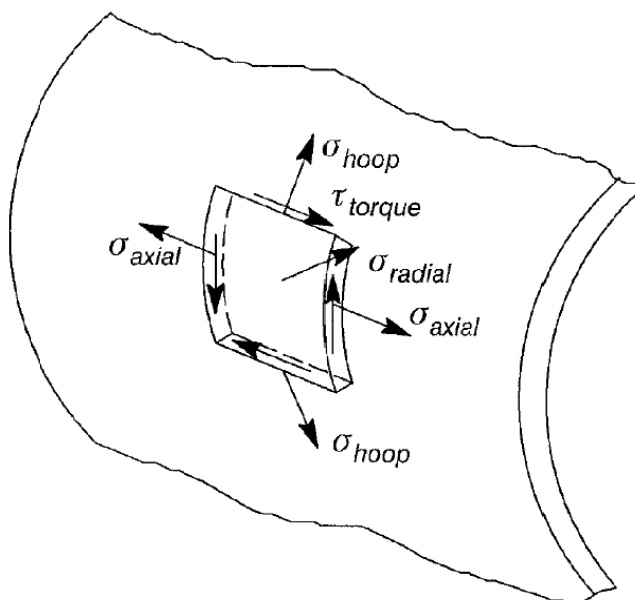
$$\bullet \tau_{smykové} = \frac{T \cdot D_i}{2 \cdot J} - \text{pro vnitřní plochu} \quad (34)$$

• T – smyková síla v geometrickém středu

$$\bullet J - \text{polární moment (kruh } J = \frac{\pi \cdot (D_o^4 - D_i^4)}{32}) \quad (35)$$

– Podle hypotézy Von Misses

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (36)$$



Obr. 15: Rozložení napětí na stěně trubky

2.7 Odpružení

[21], [26]

- Při ohybu trubek nesmíme zapomenout na elastické vlastnosti materiálu. Při ohybu trubky na stanovený úhel dojde vlivem elastických složek materiálu k odpružení ohybu, a úhel ohybu bude tedy jiný.
- Velikost odpružení je závislá na modulu pružnosti v tahu, modulu kluzu a geometrických vlastnostech.

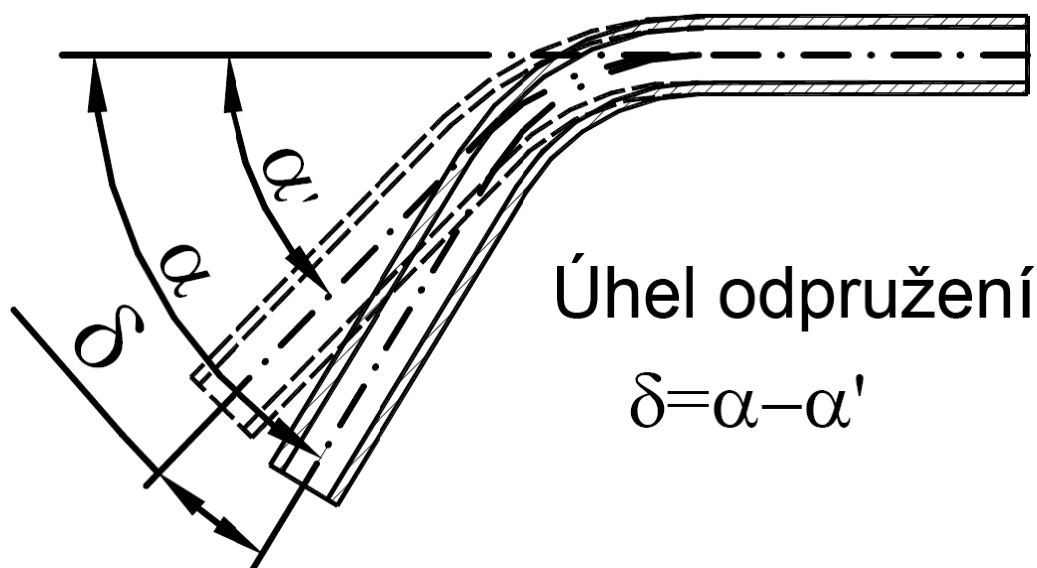
$$\begin{aligned}\tan \delta &= 0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \\ \delta &= \arctan \left(0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \right) \\ k &= 1 - x\end{aligned}\tag{37}$$

- Kde:

- δ - úhel odpružení [°]
- l_m - vzdálenost ohýbacích hran [mm]
- E - modul pružnosti v tahu [MPa]
- R_e - mez kluzu [MPa]
- k - součinitel [-]
- x - koeficient pro stanovení posunutí neutrální vrstvy

R/t	0,1	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10
x	0,32	0,35	0,38	0,42	0,445	0,47	0,475	0,478	0,48	0,483	0,486

Tab. 1: Hodnoty koeficientu x pro výpočet součinitele k



Obr. 16: Úhel odpružení

2.8 Minimální poloměr ohybu

- Je to poloměr, kdyby při jeho překročení došlo k poškození soudržnosti materiálu. Závisí především na plastičnosti materiálu, způsobu ohýbání atd.
- Výpočet minimálního poloměru se liší podle různých autorů, můžeme tedy narazit na různé možnosti výpočtu.
- Tento způsob výpočtu je vhodný pro ohýbání za studena.

$$R = \frac{50}{2,54} \cdot \frac{D}{E} \quad (38)$$

- Kde:

- D – průměr trubky [mm]
- E – procentuální prodloužení (dle tahové zkoušky)

2.9 Maximální poloměr ohybu

[11], [12], [13], [14]

- Velké poloměry ohybu jsou vhodné pro transport různých medií, ať se již jedná o kapaliny, plyny či sypké hmoty. Malé poloměry ohybu by zvyšovaly energetickou náročnost dopravy. Proto konstrukční kanceláře navrhnou, pokud je to možné, velké poloměry ohybů. Tyto ohyby ale musí být realizovatelné, proto zavádíme pojem maximální poloměr ohybu.
- Jedná se o poloměr, při kterém ještě dojde k plastické deformaci v nejkrajnějších vláknech trubky.

2.10 Určení rozměrových vlastností zkoumané trubky

[11], [12], [13], [14]

- Prvním krokem je navržení parametrů zkoumané trubky. Tyto parametry jsou:

- Vnější průměr trubky – D [mm]

- Tloušťka stěny – t [mm]

- Přípustná změna ovality – o [%]

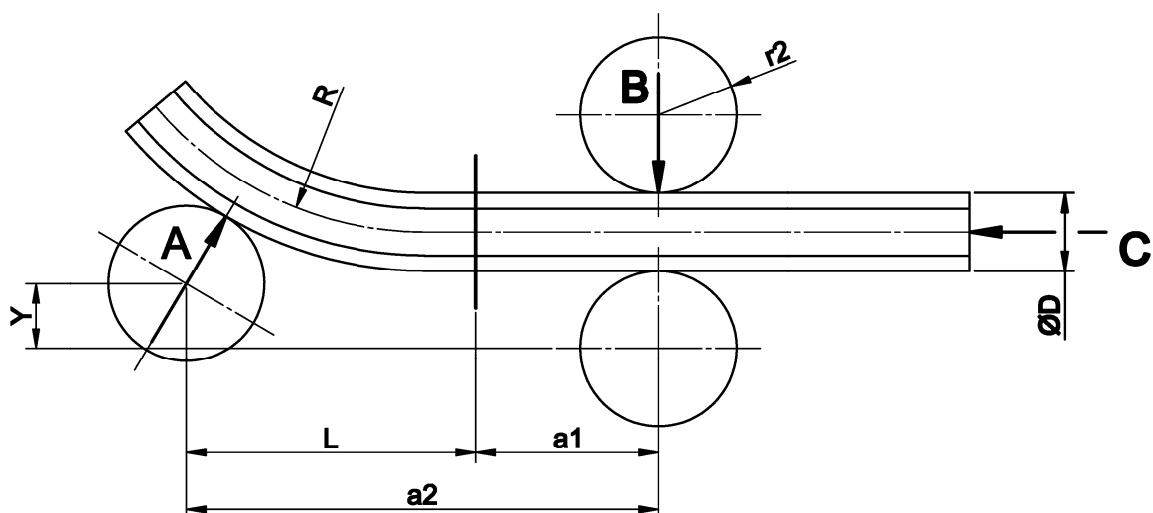
$$\bullet o = \frac{\Delta r}{r} \cdot 100 = \frac{\Delta D}{D} \cdot 100 \quad (39)$$

- Poloměr ohybu – R [mm]

$$\bullet R \geq R_{\min} \quad (40)$$

$$\bullet R_{\min} = 4 \cdot k \cdot (D - t) \quad (41)$$

- k – materiálový parametr zjištěný z plastometrického měření (tab. 2: parametry pro výpočet přetvárného odporu)



Obr. 17: Rozměrové značení pro výpočet parametrů

2.1.1 Analytická metoda výpočtu parametrů materiálu

[24],[14]

- Mezi prvními kroky, které musíme provést pro určení parametrů je výpočet přetvárného odporu.
- K výpočtu přetvárného odporu použijí tabulku s přetvárnými odpory pro tváření za tepla od autorů HENZEL, A., SPITTEL, T. „Rascet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem“. Tyto parametry materiálu jsou zjištěny experimentálně pomocí plastometrických měření.

	S_0	A_1	m_1	A_2	m_2	A_3	m_3	k
11523	100,4	18,170	0,0028	1,516	0,1181	0,750	0,124	1,800
15128	134,7	14,586	0,0027	1,629	0,212	0,726	0,139	1,828
12040	143	15,738	0,0028	1,62	0,21	0,727	1,141	1,8

Tab. 2: Parametry pro výpočet přetvárného odporu

- Kromě hodnot z již zmíněné tabulky, musíme spočítat velikost deformace, e [1]

$$e = \ln \left(\frac{R + \frac{D}{2}}{R} \right) \quad (42)$$

- Rychlost deformace, je závislá na poloměru ohybu, velikosti deformace a rychlosti posuvu trubky, \dot{e} [1/s]

$$\dot{e} = \frac{e \cdot v}{R} \quad (43)$$

- Nyní mám všechny potřebné parametry pro výpočet přetvárného odporu, a mohu ho již spočít. σ_p [Mpa]

$$\begin{aligned} C &= S_o \cdot A_1^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dot{e}^{m_3} \\ n &= m_2 \\ \sigma_p &= C \cdot e^n \end{aligned} \quad (44)$$

- Nebo v jiném vyjádření

$$\sigma_p = S_o \cdot A_1^{-m_1 \cdot T} \cdot A_2 \cdot e^{m_2} A_3 \cdot \dot{e}^{m_3} \quad (45)$$

2.12 Analytická metoda výpočtu parametrů polotovaru

[14]

- Změnu ovality můžeme spočítat podle následujícího vzorce

$$\Delta r = 0,0745 \cdot \frac{F \cdot r^3}{E \cdot J} \quad (46)$$

- Jelikož jedním ze znaků určujících kvalitu ohybu je ovalita průřezu, navrhneme maximální ovalitu, která je přípustná pro odběratele. Poté použijeme tohoto vzorce pro určení sil, které zde působí.

- Poloměr středního vlákna prstence, neutrální osa – nepůsobí tahové a tlakové složky napětí, r [mm].

$$r = \frac{D-t}{2} \quad (47)$$

- Vnitřní průměr trubky, d [mm]

$$d = D - 2 \cdot t \quad (48)$$

- Ohybový modul, modul odporu průřezu trubky v ohybu, W [mm³]

$$W = \frac{\pi}{32} D^3 \cdot \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad (49)$$

- Moment setrvačnosti průřezu vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Velikost momentu závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. Body vzdálenější od osy otáčení mají větší moment setrvačnosti. J [mm⁴]

$$J = \frac{D \cdot t^3}{12} \quad (50)$$

- Modul pružnosti E je veličinou proměnnou a závislou na teplotě. Zpravidla se snižující se teplotou klesá i velikost modulu pružnosti. Modul pružnosti je závislý pouze na vlastnostech materiálu, nikoli na jeho rozměrech. Velikost modulu pružnosti lze zjistit z Hookova zákona $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$.

2.13 Analytická metoda výpočtů technologických parametrů [14]

- Ohýbací kladka je nastavována v podélném a příčném směru podle zvolených vlastností výsledného ohybu. Y [mm]

$$Y = R + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R + \frac{D}{2} + r_2 \right)^2 - L^2} \quad (51)$$

- r_2 je minimální průměr kladky, pro výpočet vysunutí, musíme určit vzdálenost L , která je popsána níže.
- Při ohybu za tepla se také vyskytuje odpružení, jeho velikost klesá se zvyšující teplotou. Provedeme tedy korekci daných vztahů. Pro výpočet jsme použily vzorce klasického typu pro dynamické ohýbací parametry pro výpočet momentů a sil při zakružování. $M_{o,pl}$ [Nm]

$$M_{o,pl} = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{2 + n} \quad (52)$$

- Kromě vysunutí kladky, musíme zjistit také v jaké vzdálenosti se má dané vysunutí uskutečnit, L_{min} [mm]

$$L_{min} = \frac{\pi \cdot \sigma_p \cdot D^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{D - 2t}{D} \right)^4 \right]}{32 \cdot F} \quad (53)$$

- Minimální velikost vysunutí je dána parametry stroje. $L = a_2 - a_1$
- Poloměr ohybu při úvaze s odpružením, R_n [mm]

$$R_n = \frac{R \cdot E \cdot I}{M_{o,pl} \cdot R + E \cdot I} \quad (54)$$

- Vzorec pro vysunutí tedy můžeme upravit do následujícího tvaru

$$Y = R_n + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_n + \frac{D}{2} + r_2 \right)^2 - \left(a_2 - \frac{a_1}{2} \right)^2} \quad (55)$$

- Přítlačná síla vodící kladky, F_{vkl} [MN]

$$F_{vkl} = \frac{M_o}{L} \quad (56)$$

- Přítlačná síla ohýbací kladky, F_{okl} [MN]

$$F_{okl} = \frac{M_o}{L \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (57)$$

- Přítlačná síla tlačného zařízení, F_{tlzr} [MN]

$$F_{tlzr} = \frac{M_o}{L \cdot \tan \left[\arcsin \left(\frac{L}{R + \frac{D}{2}} \right) \right]} \quad (58)$$

- Výsledná ovalita, o [%]

$$o = 7,45 \cdot r^2 \cdot \frac{F_{ohkl}}{E \cdot J} \quad (59)$$

3 Sestavení konstitutivní matice a modelu procesu ohýbání

- Model použitý pro simulaci je vytvořen v modelovacím softwaru firmy PTC. Model byl vyexportován ve formátu kompatibilním s Qform3D, ve kterém proběhly simulace, ruské firmy QuantorForm.

3.1 Software

[9]

3.1.1 Pro/Engineer

- Pro/Engineer je software určený pro strojírenský segment. Zahrnuje v sobě podpůrné moduly CAD (Computer Aided Design – 2D/3D kreslení pomocí počítače), CAM (Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba) a CAE (Computer Aided Engineering – Počítačem podporování konstruování – zahrnuje v sobě jak simulace, testování a analýzy MKP/FEM ...).
- Takto vybavený software, který v sobě integruje již výše zmíněné prvky je velmi pružný a efektivní při jakémkoliv použití. Z toho plyne i jeho různorodé využití v praxi, mezi zajímavé podniky, které tento produkt využívají, jsou: AUTOPAL s.r.o., ŠKODA AUTO a.s., AVX Czech Republic s.r.o., Metaz a.s., Isolit-Bravo spol. s.r.o., atd.
- Mimo firmy je tento software vyučován i na prestižních vysokých školách jako VŠB Ostrava, VUT Brno, ČVUT Praha atd.
- Výše jmenované instituce jsou vybrány pouze z České republiky.
- Práce v Pro/Engineer-u je plně intuitivní, velkou výhodou je jeho parametrizace, kdy můžeme doslova měnit výsledný výstup jedním kliknutím.
- Parametrizace produktu mi takto umožňuje velmi efektivně vytvořit parametrický model základního prvku – tedy tvářené ocelové trubky.

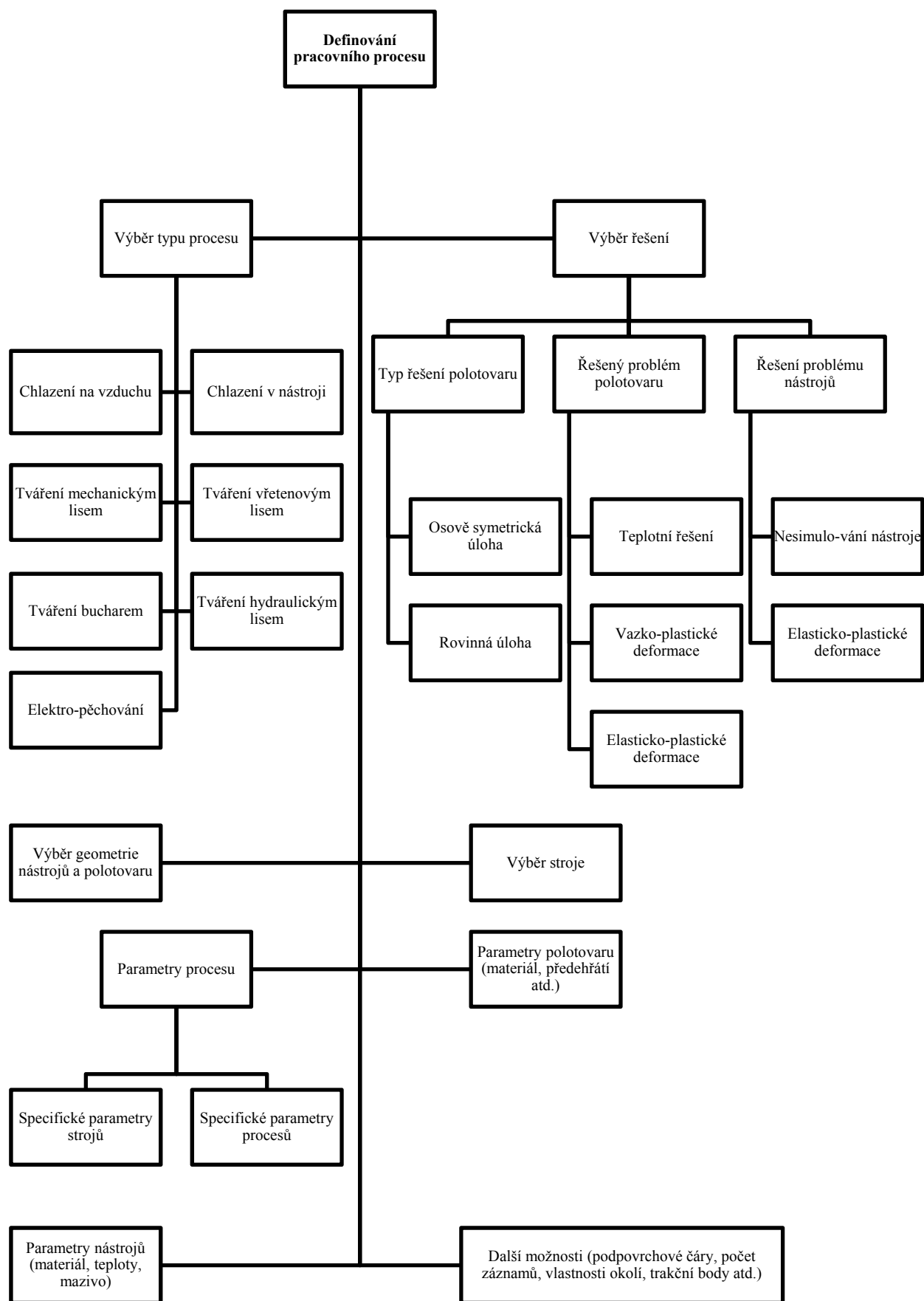
A na tento model vytvořit další závislé prvky jako jsou ohýbací kladky atd.

- Jedinou změnou parametrů ocelové trubky tak mohu jednoduše změnit celou sestavu nástrojů.
- Mezi další nepochybné výhody parametrizace tak jak ji uvádí Pro/Engineer patří možnost využití vzorců, které jsou v integrovaném editoru mnohem přehlednější než u jiných softwaru podobné třídy.
- Pro/Engineer existuje v celé řadě verzí a obsahuje různé verze modulů. Pro takto jednoduchý návrh není potřeba dalších zásuvných modulů. Pro samotné modelování postačí jak Pro/Engineer Wildfire 2.0 tak i jakákoliv vyšší verze.
- V dnešní době je nejvyšší verze Pro/Engineer-u Wildfire 5.0 která je mnohem přehlednější a výkonnější než starší verze, obsahuje i nový modul Manikin (Manikin Extension, Manikin Analysis Extension), který je vytvořen pro simulaci interakce člověka s výrobkem.
- Pro/Engineer je možné mít i ve verzi české.

3.1.2 Qform 3D

- Program firmy QuantorForm nazvaný Qform3D je oproti předchůdci Qform2D určen pro analýzu 3D modelů.
- Qform3D byl vyvinut v roce 2002 jako rozšíření již existujícího Qform2D. Software kombinoval 2D a 3D simulaci a obsahoval přehledné ovládání svého předchůdce.
- Software má v sobě zabudovaný materiálový editor – jeho součástí je základní katalog materiálu a jejich vlastností na nástroje, polotovary a maziva. Obsahuje též databázi strojů – mechanické lisy, buchary, vřetenové lisy, hydraulické lisy a jejich charakteristiky. Součástí je i editor pro 2D geometrii a editor pro 3D geometrii.
- Načtení 3D geometrie je možné ve formátech STL, IGS, SHL, STEP, STP, QSHAPE.

- Načtení 2D geometrie je možné ve formátech DRF, CRS, DXF, IGS, SHL, STEP, STP
- Mezi velkou výhodou je téměř stejný postup práce v Qform 3D a Qform 2D. Po přípravě modelu v některém modelačním softwaru nebo i za použití interního editoru geometrie nastavíme modelům co je polotovar (Workpiece), a nástroj (Tool1, Tool2 atd.) Tím je přímo nadefinováno co má ta či ona geometrie za význam. Při přejímání geometrie se provede kontrola a na případné chyby (geometrické) je uživatel upozorněn.
- Celý proces definování parametrů tváření je připraven ve formě jednoduchého průvodce.



- Mezi nespornou výhodou tohoto průvodce patří, že nás provede jednotlivými nutnými kroky tak, abychom zajistili nadefinování všech vlastností, které jsou pro výpočet stěžejní.
- Softwary Qform2D a Qform3D dokážou simulovat i vícenásobné operace. Po první operaci převezmou polotovar a použijí ho na další operaci, kterou znovu vytvoříme pomocí průvodce. Takto můžeme nasimulovat reálné vlastnosti konečného výrobku.

3.2 STEP – STP

- Pro přenos dat ze software Pro/Engineer jsem použil formátu STEP, výhodou je přímá podpora Qform3D.
- Souborový formát STEP pochází z rodiny produktů Catia. Je založen na standartu pro výměnu modelových dat (**ST**andard for the **E**xchange of **P**roduct model data)
- Catia, neboli Computer Aided Three Dimensional Interactive Application je multi platformní CAD/CAM/CAE software vyvinutý Dassault Systemes.

3.3 Výběr trubek vhodných pro analýzu

- K dispozici máme velkou škálu rozměrů vyráběných trubek vhodných pro analýzu.
- Bude výhodné zvolit jednoho představitele tenkostěnných a druhého tlustostěnných trubek.
- Samotná hranice pro určení tenkostěnnosti je velice nepřesná, je vytvořeno několik rozhodovacích kritérií, podle kterých se daná trubka zařadí.
- Použiji poměr $D/s > 25$ pokud trubka tuto podmínku splní, jedná se o tenkostěnnou trubku.

- Tomuto vyhovuje trubka 377-16 jako trubka tenkostěnná, a trubka 406-45 jako trubka tlustostěnná.
- Tyto trubky jsem zvolil záměrně, protože při jejich tváření za studena dochází k nejvyšším silovým namáháním stroje.

3.4 Poloměr ohybu trubek

- Pomocí výpočtu v kapitole č.: 2.10 určení rozměrových vlastností zkoumané trubky.
- Určil jsem tyto minimální poloměry ohybu:
 - 406-45 : 2600 mm
 - 377-16 : 2500 mm

3.5 Volba materiálu pro analýzu

[12]

- Pro obě zkoumané trubky se při výrobě používají materiály, jako jsou 11 353, 11 523, 12 022 a 15 128.
- Nevýhodou systému Qform je teprve se rozvíjející databáze materiálů. Můžeme sice využít možnosti zadávat vlastnosti materiálu pomocí materiálových parametrů.
- Materiálové parametry jsou většinou získány z plastometrických měření. Často se stává, že jejich hodnoty jsou naddimenzovány.
- Proto radši využijeme některého materiálu, který je přítomen ve stávající knihovně materiálů a je zapsán maticově. Údaje z výpočtu při takto zadaných vlastnostech bude více přesná.
- Nejbližší ekvivalent k materiálu 11 523 v jiném značení St52 je materiál C35 nebo Ck35 podle klasického značení 12 040. Tento ekvivalent je možné použít i pro druhou zvolenou ocel 15 128. Ekvivalent 12 040 je možné použít pouze pro srovnání při tváření za tepla.

3.6 Rychlost posuvu trubky do ohybu

- Rychlost přísuvu trubky bude zajišťovat tlačné zařízení, zde TOOL 1. V praxi je trubka uchycena k suportu, ten vykonává pohyb.
- Rychlost posuvu je stejná jak pro rozměr 377-16 tak pro rozměr 406-45. Rychlost posuvu je stanovena na 24.92 mm/s.

3.7 Akceptované úpravy modelu ohýbacího aparátu

- Při návrhů geometrie jsem se snažil přiblížit co nejvíce reálným podmínkám při realizaci ohybů. Použitá verze simulačního softwaru neumožňuje nastavit některé prvky tak, jak by bylo optimální, proto jsem musel přijmout určitá zjednodušení.
- První ze zjednodušení spočívá ve vypuštění vodících kladek. Jako další opatření byl změněn způsob ohřevu ohýbaného materiálu.

3.7.1 Ohřev kladkami

- Dále označován jako první verze výpočtu.
- Qform3D ve verzi, která je použita k výpočtu nemá zahrnutou možnost počítat s indukčním ohřevem, proto jsem nahradil ohřívací prstenec dvěma kladkami, a to tak že obepínají téměř celý obvod ohýbané trubky a nahrazují tak indukční ohřev.
- Ohřev budou zajišťovat dvě kladky, je ale nutné celou součást zchladit v určité vzdálenosti od místa ohřevu. Snažíme se o to, aby deformace probíhala v oblasti, kde je trubka zahřátá až do oblasti, kde je trubka zchlazena. Tím se nám sníží velikosti sil, které budou působit na strojní aparát. Teplota okolí je nastavena na 20°C. Simulovali jsme prostředí, kde ohýbaný materiál je zahříván pouze kladkami.
- Bohužel po provedené simulaci se tento předpoklad ukázal jako nevhodný. Na kladkách dochází ke ztrátě ovality trubky, tudíž

nedochází k plnohodnotnému styku s ohřívacími kladkami a trubicí, jak bylo uvažováno. Dochází pouze k dotyku v několika bodech. Materiál není prohřán v celém průřezu a průměru.

- Tento model ohřevu není vhodný!

3.7.2 Dohřev kladkami

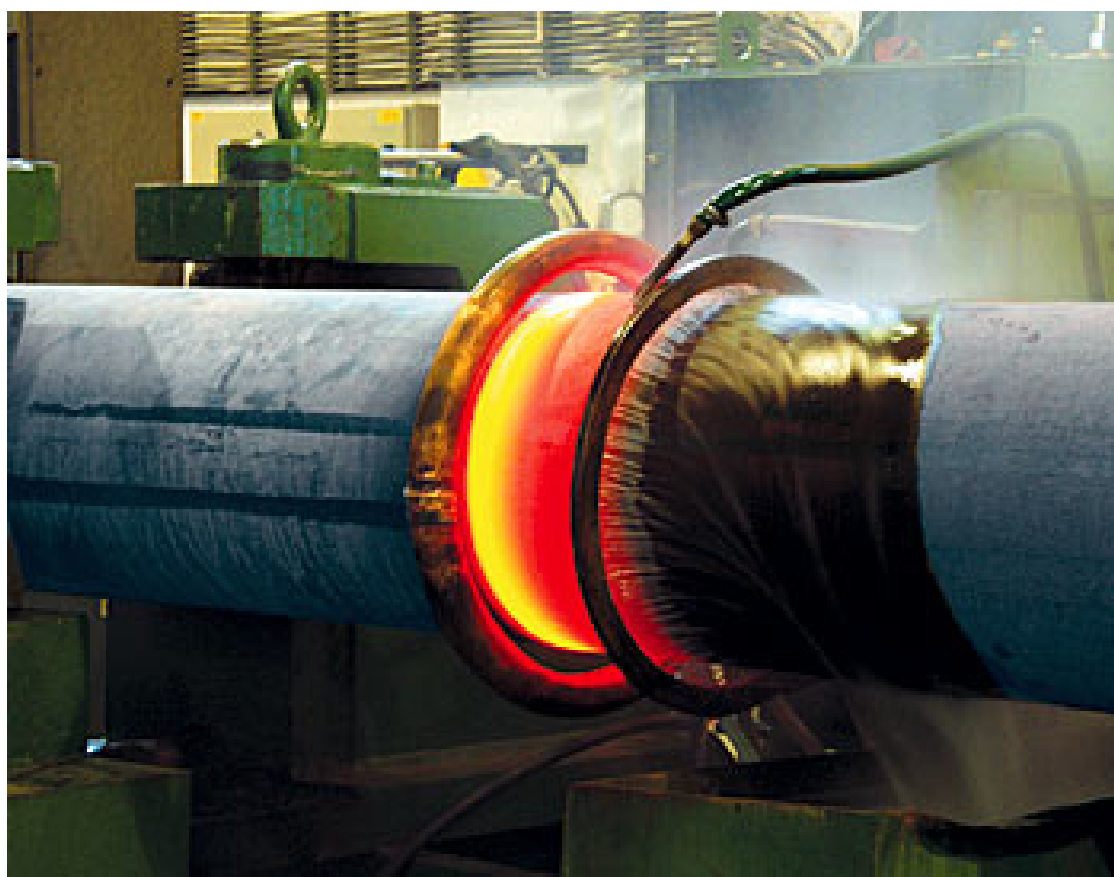
- Jelikož první model ohřevu nebyl vhodný, museli jsme změnit výchozí předpoklady a přednastavit simulaci, v několika ohledech.
- Teplota ohřívacích kladek je zvolena vyšší, k příznivému teplotnímu rozložení na trubce (trubka se ohřívá jen v několika místech dotyku), teplotu jsme nastavily na 1200°C.
- Ohýbací kladka má stejnou teplotu jako okolí a to 20°C. Tento parametr je shodný s prvním modelem ohřevu.
- Polotovár je ohřátý v době procesu na teplotu v rozmezí 650÷700°C.
- Teplota okolí je ponechána na 20°C.
- Simulaci ohýbání nebudeme provádět pro celý oblouk, tedy 90° ale jen pro malý úhel tak, aby došlo k provedení části ohybu. Tím docílíme stejného silového poměru jako při ohýbání celého úhlu. Hodnoty tak budou dostačující a výpočetní doba se extrémně zkrátí.
- Nesmíme zapomenout, že takto dosažené výsledky jsou částečně zkrácené, a to například díky použitým zjednodušením vyplývajících z omezujících podmínek softwaru, a časových omezení.
- Simulace bude provedena pro materiál 12 040. Simulaci budeme provádět pro dvě rozdílné trubky. Trubicí silnostěnnou a tenkostěnnou.

3.8 Procesní model ohýbacího aparátu

- Před akceptováním daných omezujících podmínek a zjednodušení vypadá proces ohýbání za tepla jak na obrázku níže.

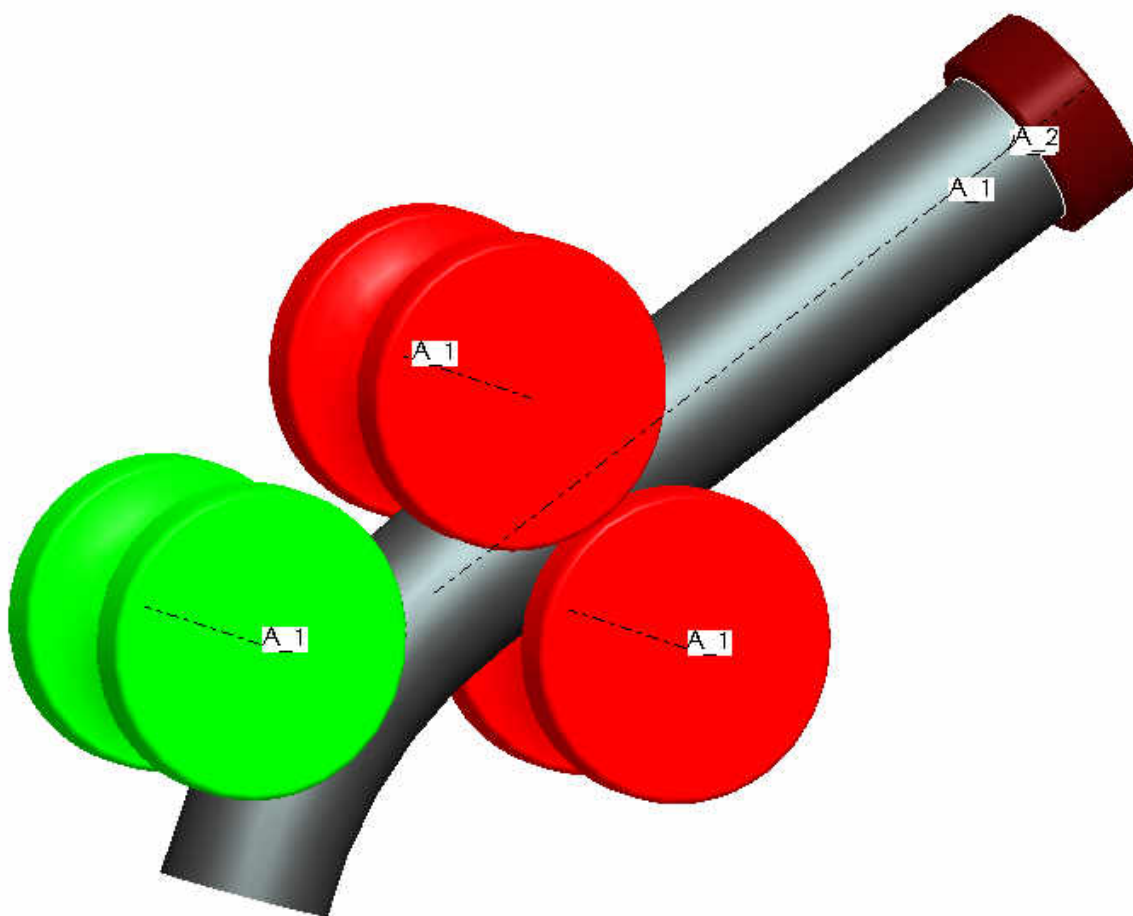


Obr. 18: Ohýbací zařízení ve firmě Jinpo Plus a.s.



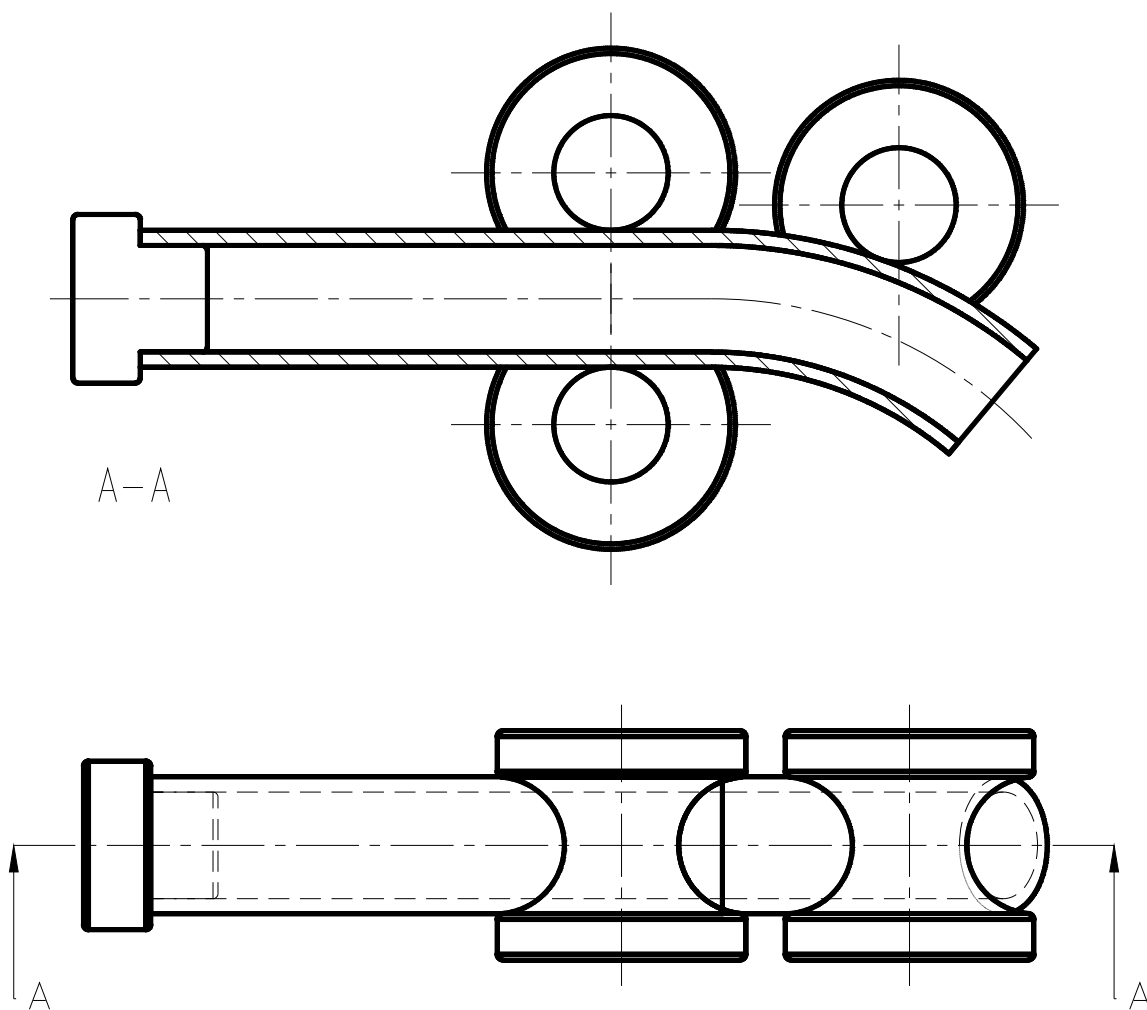
Obr. 19: Detail prstenců indukčního ohřevu a chlazení

- Je zde viditelný support, který tlačí trubku do ohybu, dále je zde indukční ohřev a chladičí zařízení. Trubka je vedena ve čtyřech bodech dotyku. Na druhém obrázku je viditelná oblast kde dochází k deformaci, jedná se o oblast mezi induktorem a chlazením.
- Navrhnutá geometrie nástrojů s přijatými omezeními je na obrázku níže. Je již pozorovatelná úprava, trubka je vedena jen ve dvou bodech. Červeně jsou označeny kladky sloužící jako ohřev, zeleně je vyznačena tlačná kladka zajišťující ohyb trubky.



Obr. 20: Procesní model ohýbání

- Směr pohybu bude pouze dopředný ve směru zelené kladky, která nám ohýbá materiál.



Obr. 21: Pohled na sestavu již po přijetí zjednodušení

3.9 Materiálový reprezentant - 12 040

[15],[16]

- Tato ocel je vhodný pro velké hřídele stabilních spalovacích motorů, parních strojů a čerpadel. Dále hřídele těžkých strojů transmisní hřídele, sloupy a válce lisů, tvarová tělesa, čepy, kolíky rozpěrná pouzdra, čelisti, pístnice, ojnice, závěsy pružin atd.
- Jedná se o ocel se zvláštními vlastnostmi, je vhodná pro zušlechťení a povrchové kalení. Její obrobitelnost může být zhoršena působením zvýšené pevnosti po válcování. Je vhodnější na obrábění použít

materiál ve stavu žíhaném na měkko. Ocel je stříhatelná ve stavu jak zastudena, tak i ve stavu po válcování

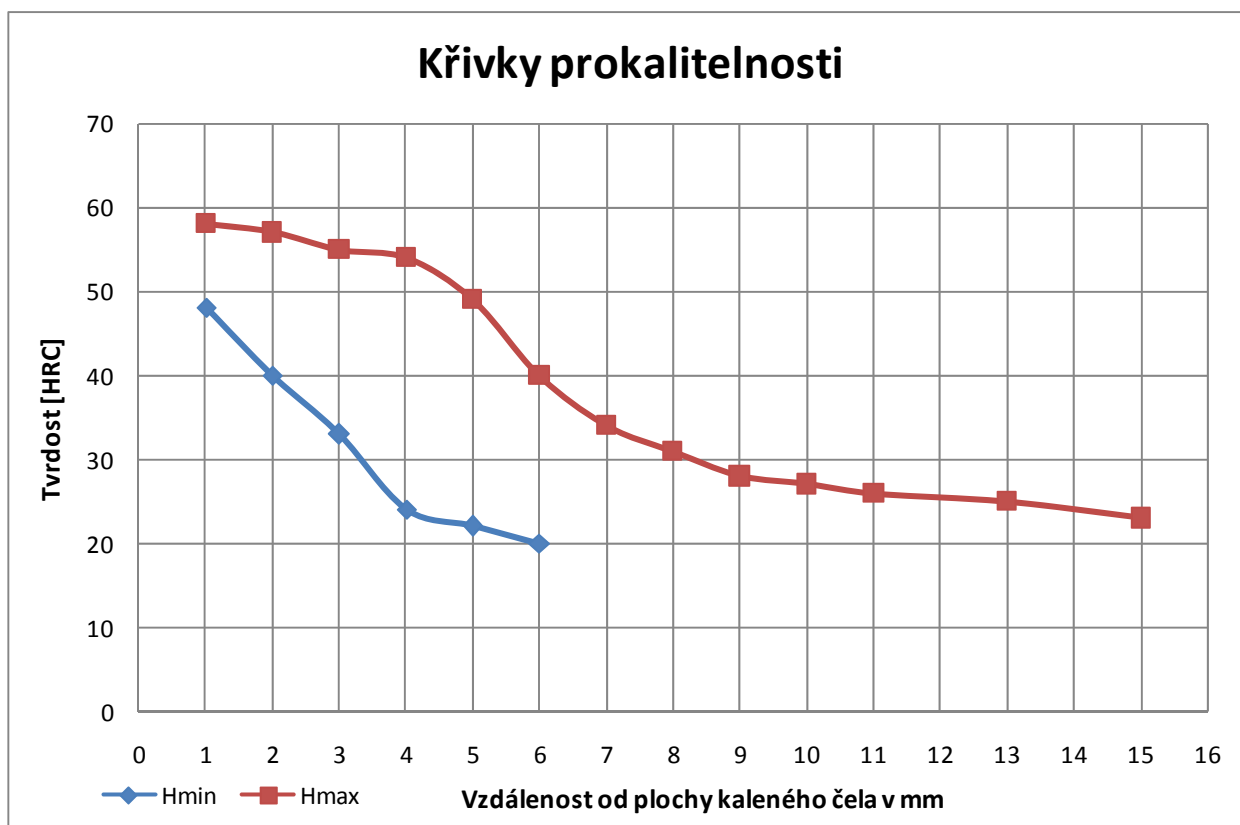
Chemické složení							
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
0,32÷0,39	max. 0,4	0,5÷0,8	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,4	0,04	max. 0,4

Tab. 3: Chemické složení oceli 12 040

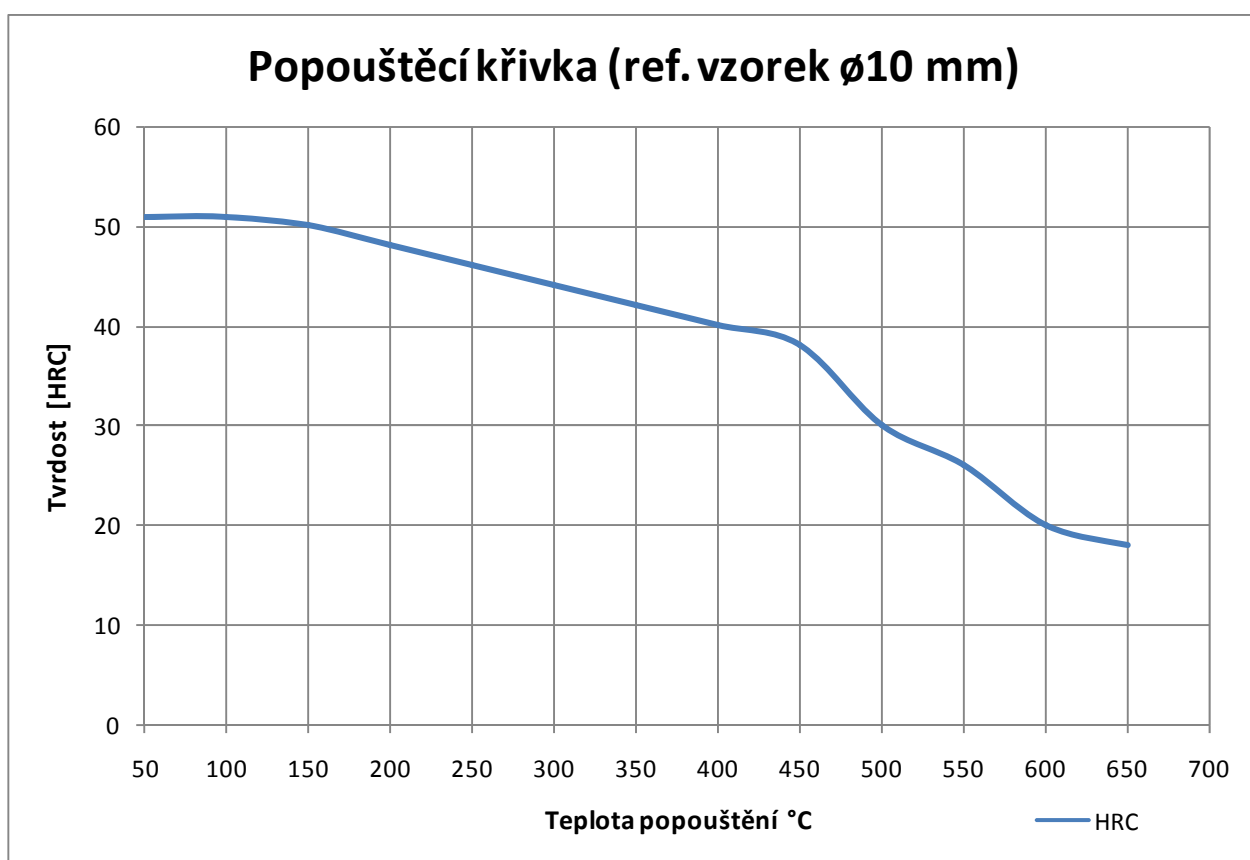
Norma	Označení
ISO 683/1-87	C35E4
EN 10083-2-91	C35
EN 10083-1-91	C35E
EB 86-70	C36
GB 699-88	35
JIS G4051-79	S35C
EN 10250-2:1999	1.0501

Tab. 4: Světové ekvivalenty

- Teploty přeměn:
 - $A_{C1}=720\div735^{\circ}\text{C}$
 - $A_{C3}=770\div795^{\circ}\text{C}$
 - $M_s=335^{\circ}\text{C}$
- Povrchová tvrdost při povrchovém kalení:
 - Při průměru menším jak 40 mm je tvrdost 53 ± 3 HRC
 - Při průměru $41\div100$ mm je tvrdost 53 ± 3 HRC



Graf 1: Křivky prokalitelnosti pro materiál 12 040



Graf 2: Popouštěcí křivka pro materiál 12 040

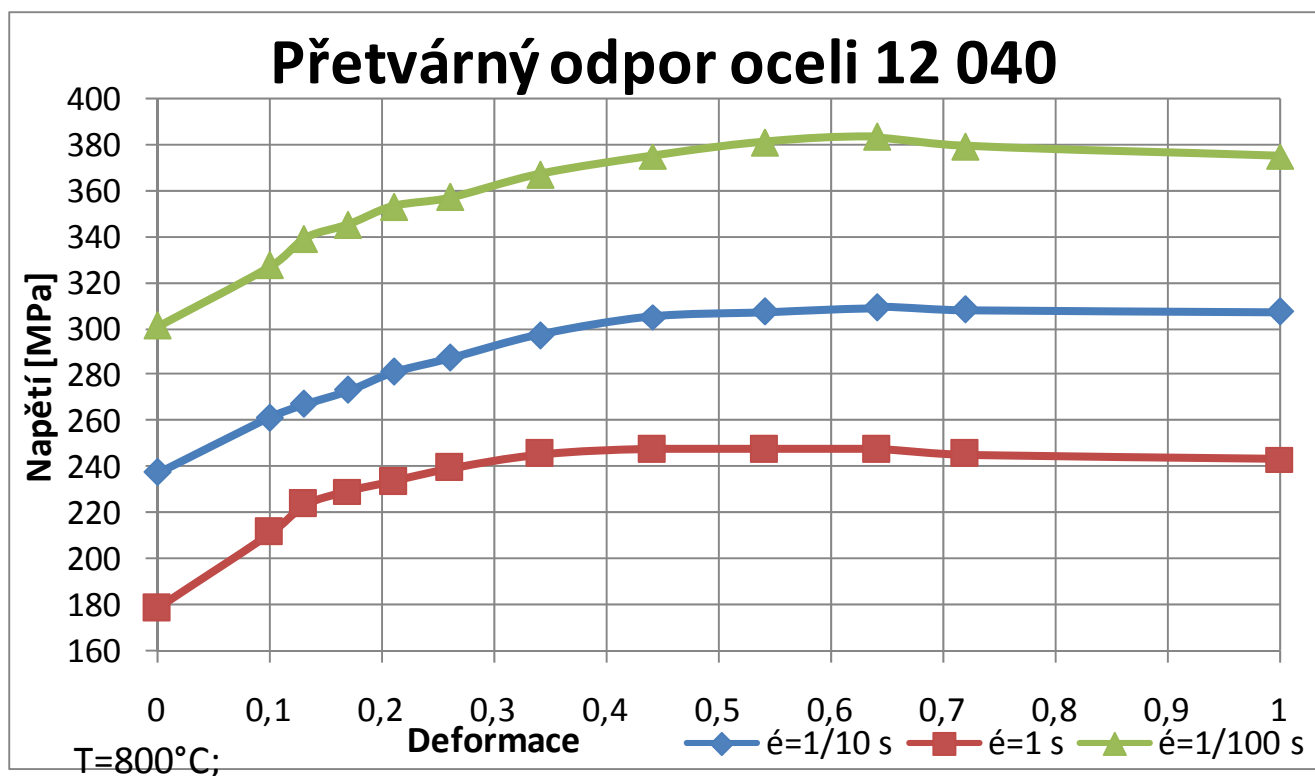
Tepelné zpracování		
Normalizační žíhání	Žíhání na měkko	Isotermické žíhání
860÷890 Ochlazovat vzduchem	640÷720°C Ochlazovat v peci	840÷950°C 650°C - 1 hod.
Teplota kalení	Kalicí prostředí	Teplota popouštění
840÷880°C	Voda/olej*	550÷660°C
Zkouška kalením čela		
870±5°C		

*Kalicí medium při použití spodních kalících teplot je doporučeno použití vody. Při použití horních kalících teplot je doporučeno použít olej.

Tab. 5: Podmínky tepelného zpracování oceli 12 040

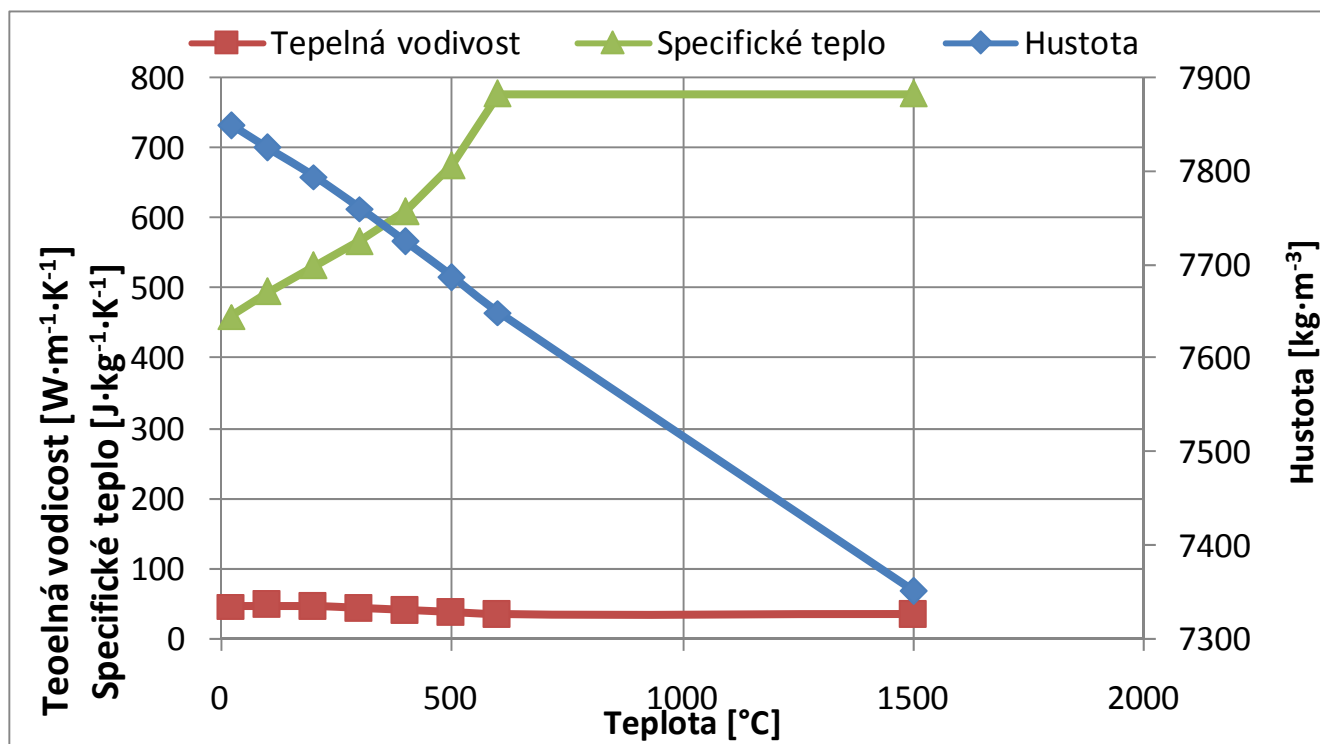
- Materiál je vhodný pro tváření za tepla, doporučované teplotní rozmezí je 800÷1150°C, doporučováno je pomalu ochlazovat. Materiál je zařazen v první třídě tváritelnosti.

3.10 Konstitutivní matice přetvárných odporů

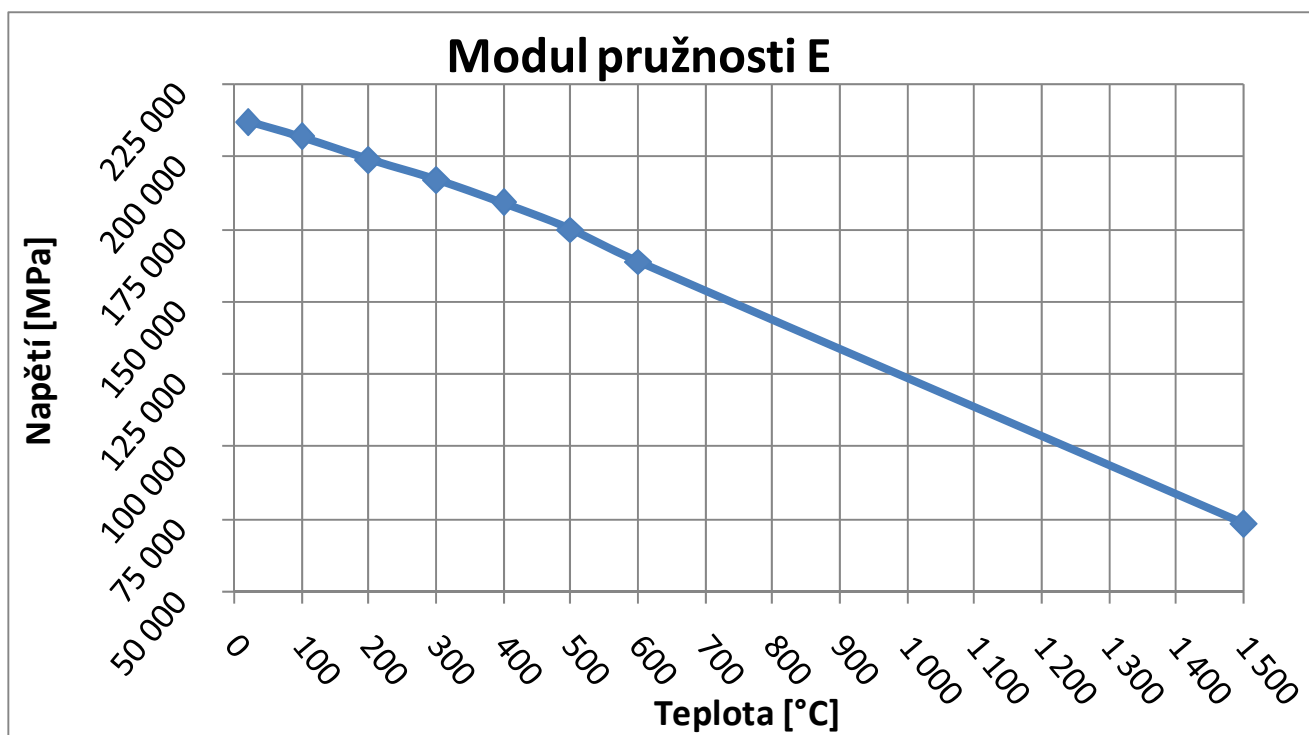


Graf 3: Přetvárný odpor oceli 12 040

3.11 Matice tepelně závislých parametrů



Graf 4: Tepelně závislé parametry materiálu 12 040

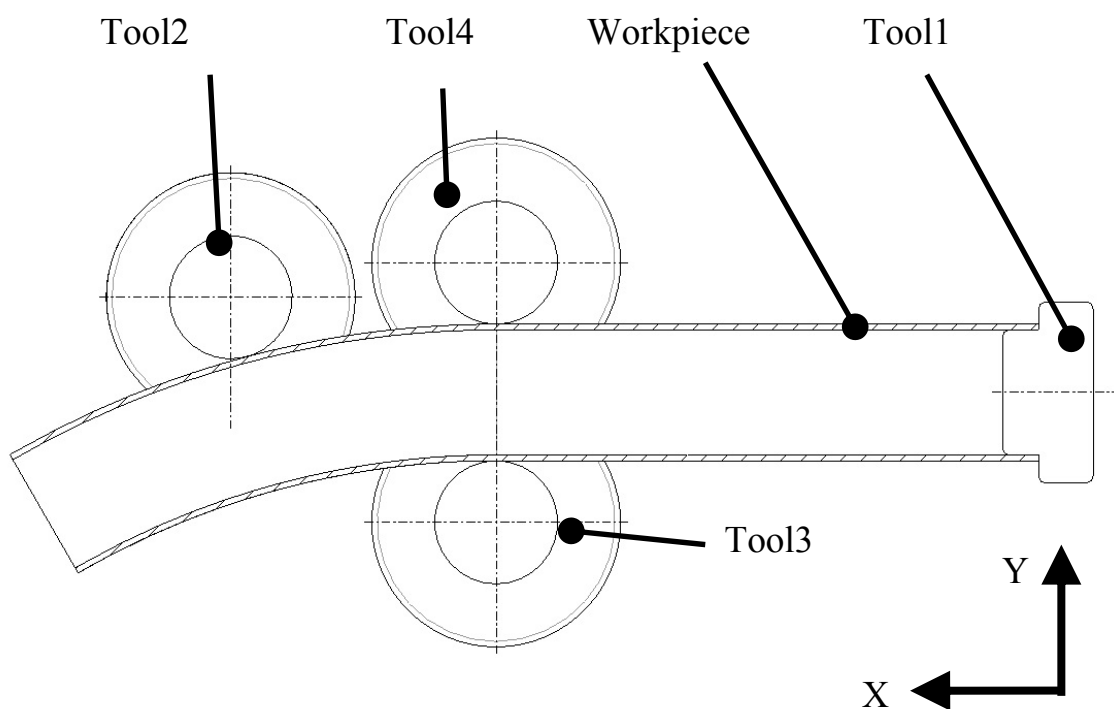


Graf 5: Modul pružnosti materiálu 12 040

4 Analýza technologie ohýbání trubek pro materiálový reprezentant

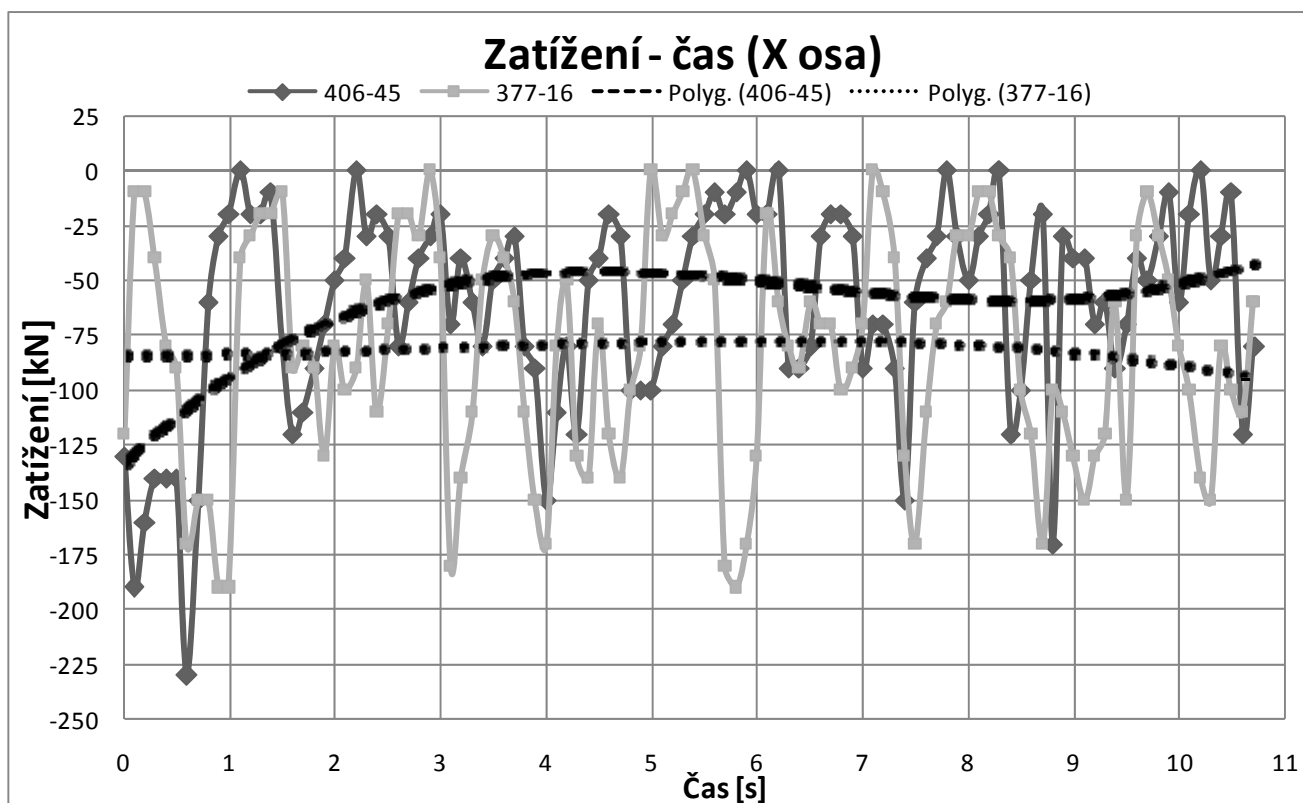
4.1 Schéma rozmístění nástrojů a jejich orientace

- Tool1 tlačné zařízení
- Tool2 označuje ohýbací kladku
- Tool3 a Tool4 kladky vodící
- Workpiece – polotovár – ohýbaná trubka

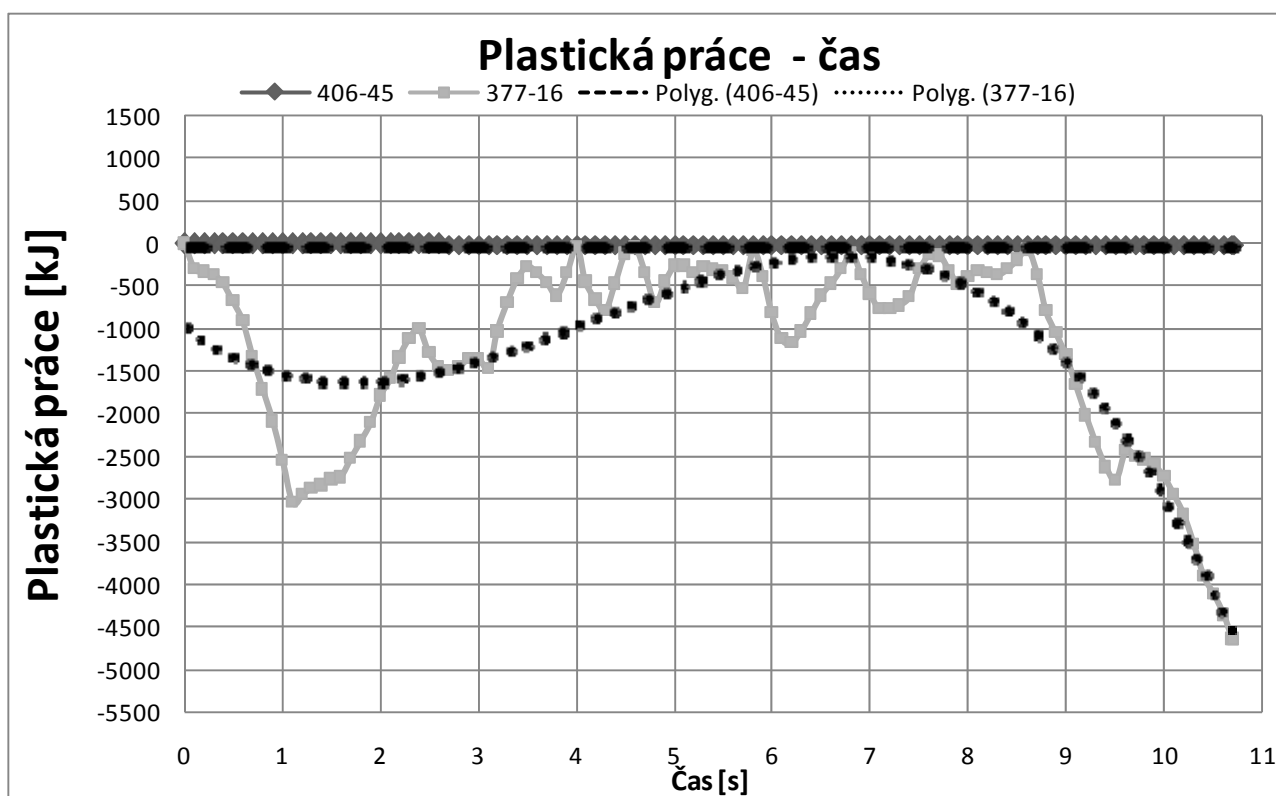


Obr. 22: Schéma nástrojů a jejich popis pro grafy

4.2 Parametry nástroje Tool1

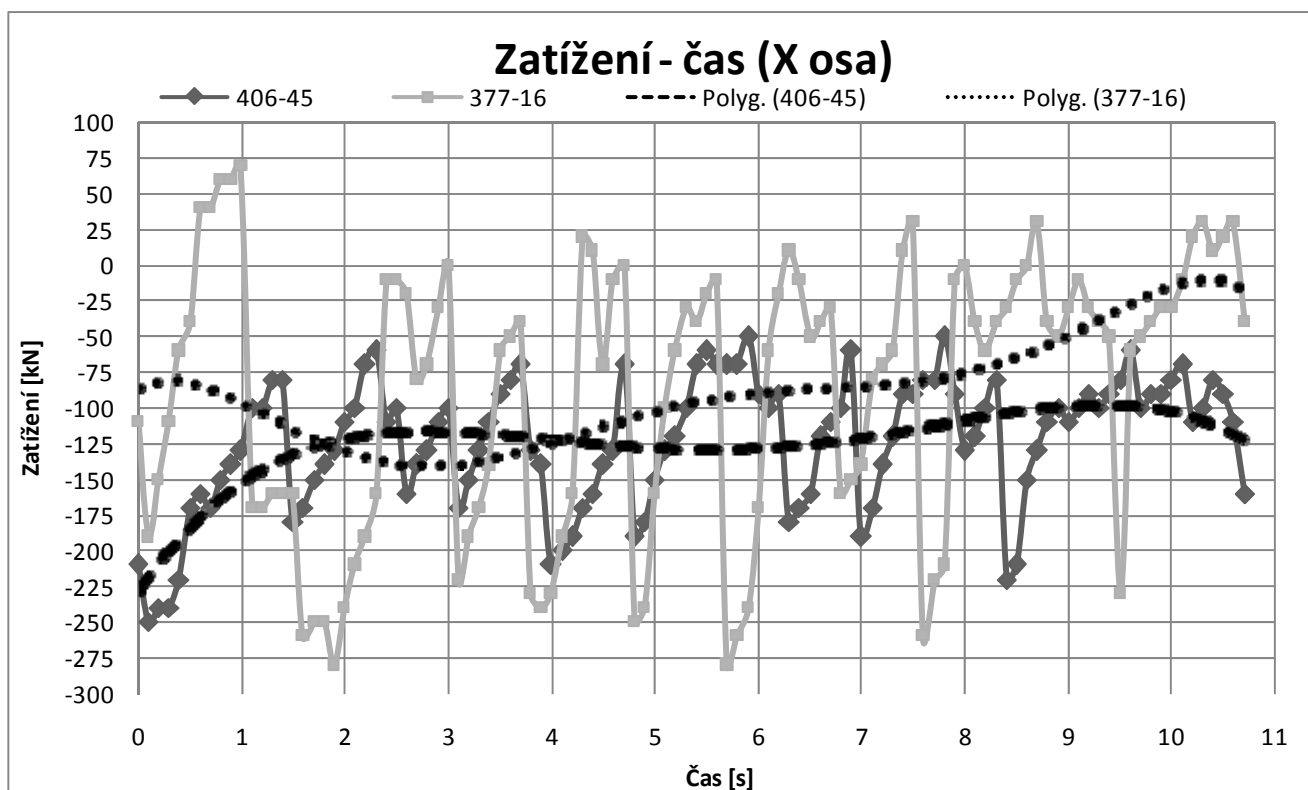


Graf 6: Tool1 - zatížení - čas - osa X

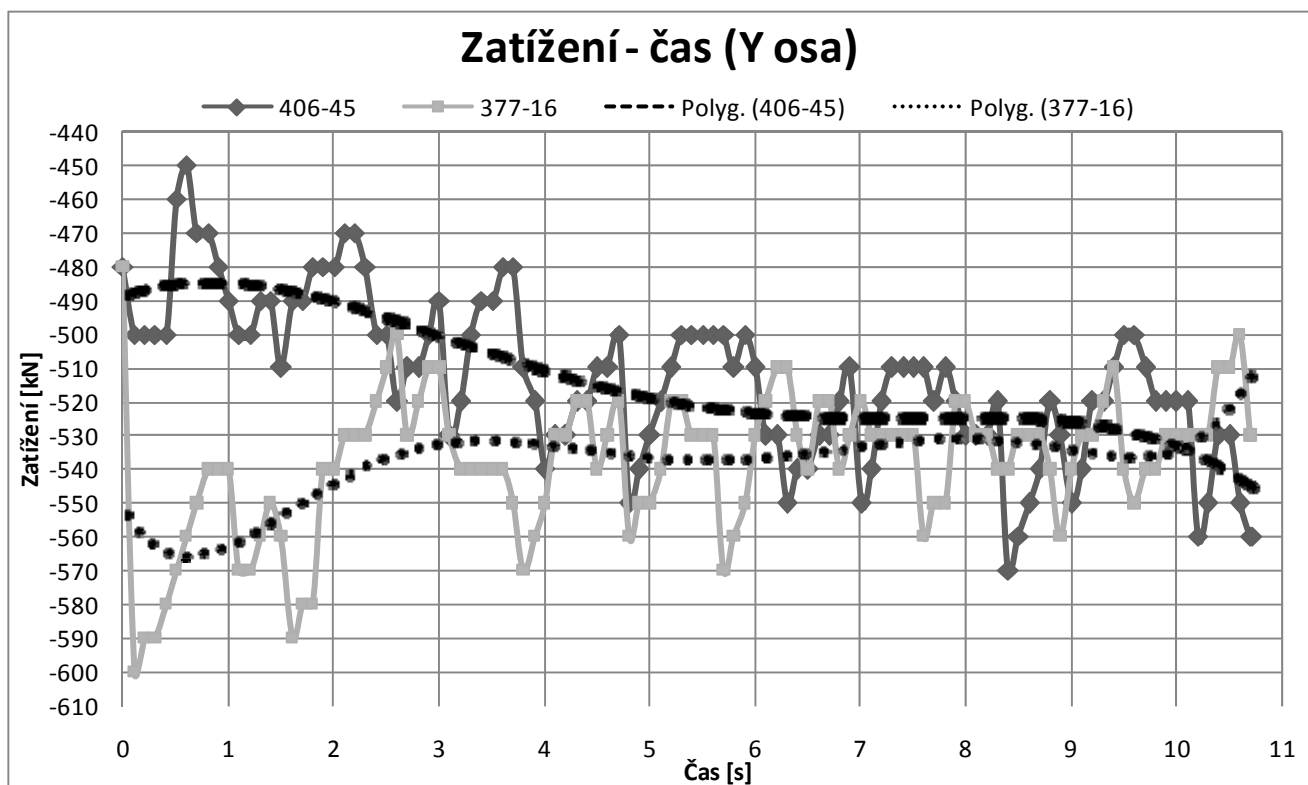


Graf 7: Tool1 - zatížení - čas - osa Y

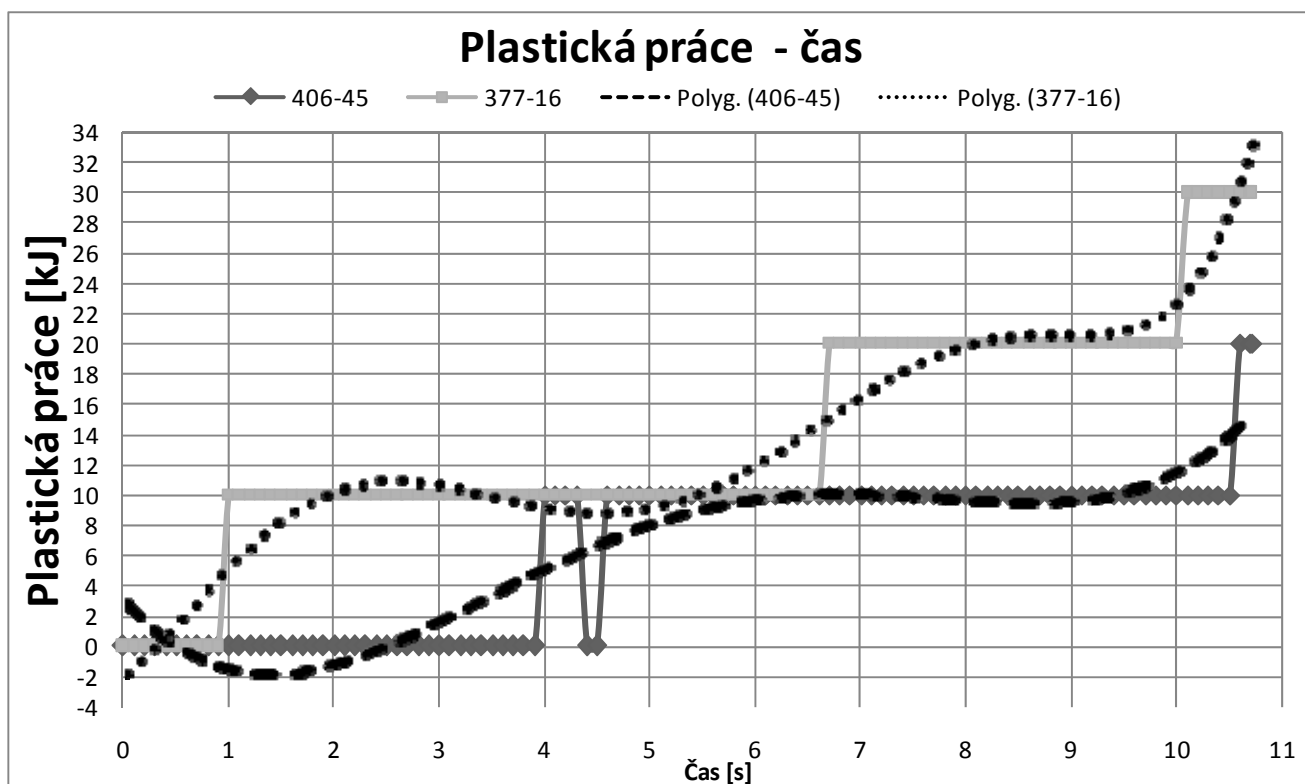
4.3 Parametry nástroje Tool2



Graf 8: Tool2 - zatížení – čas – osa X

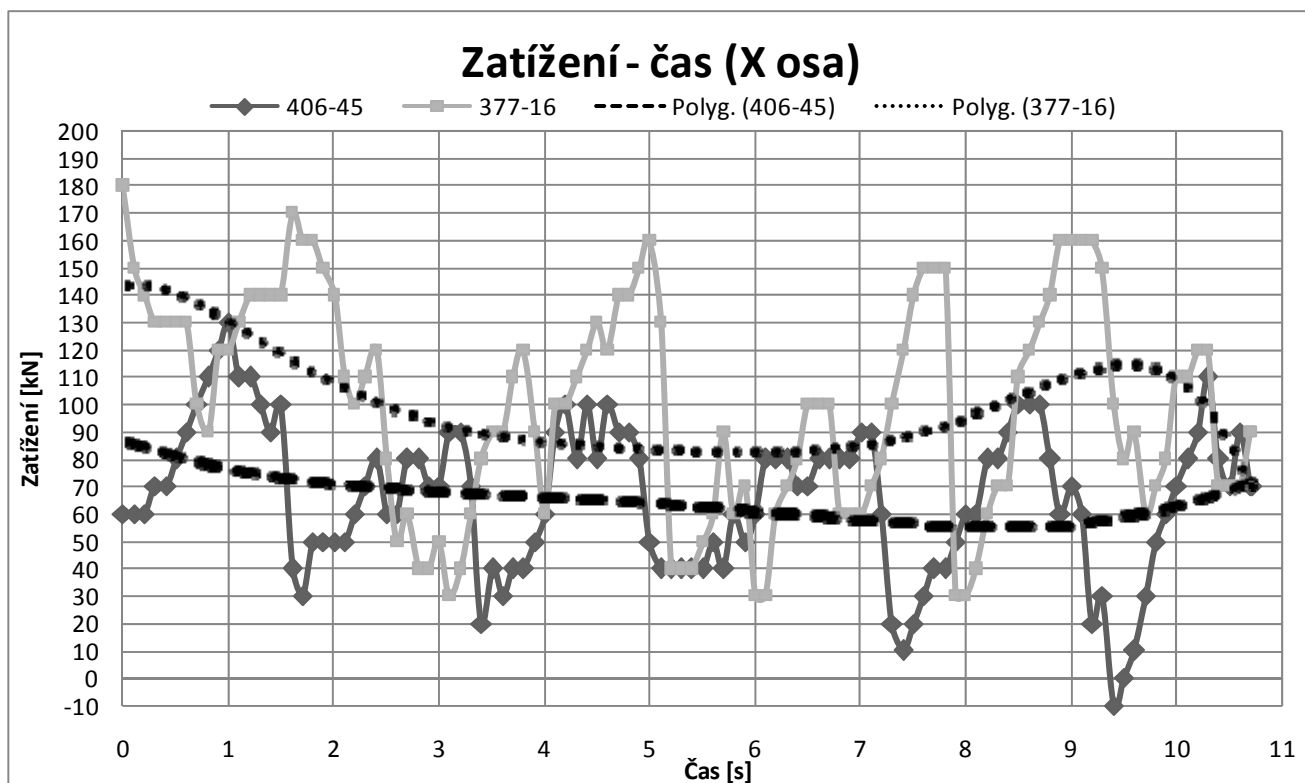


Graf 9: Tool2 - zatížení – čas – osa Y

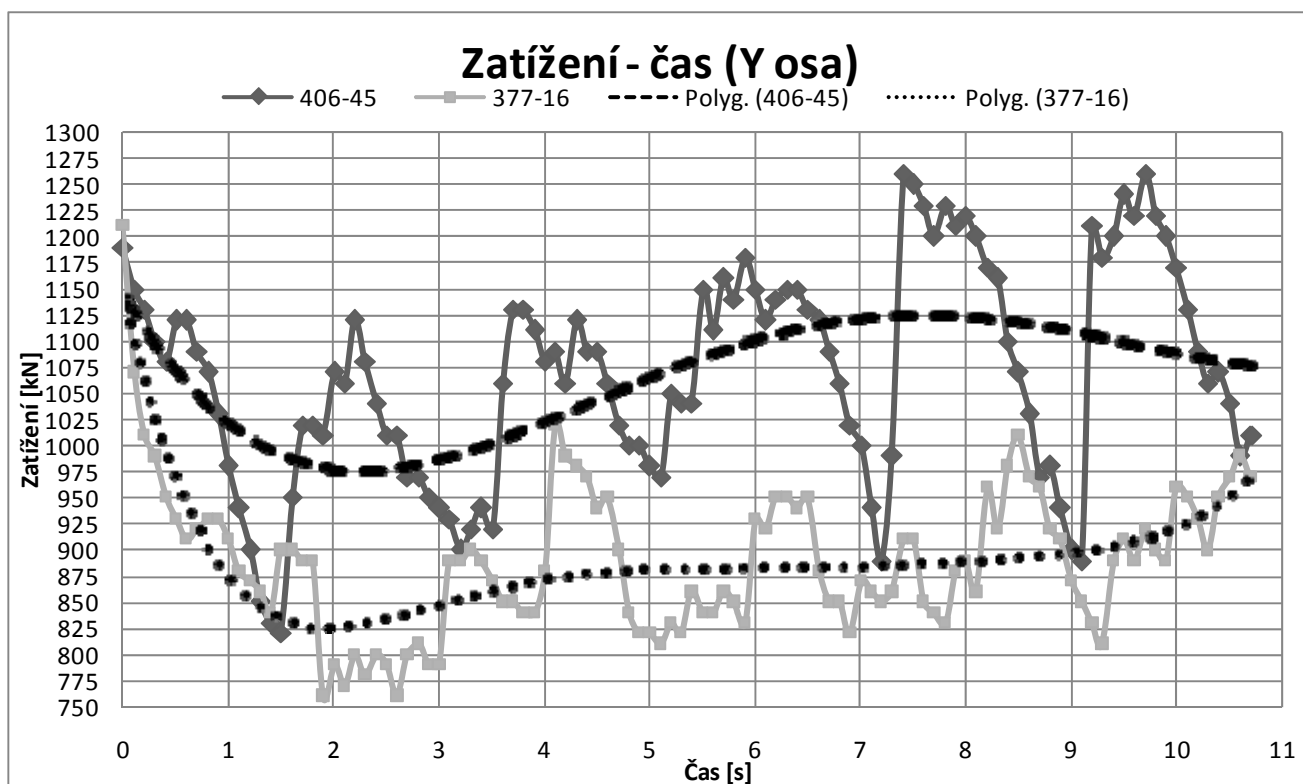


Graf 10: Tool2 - plastická práce - čas

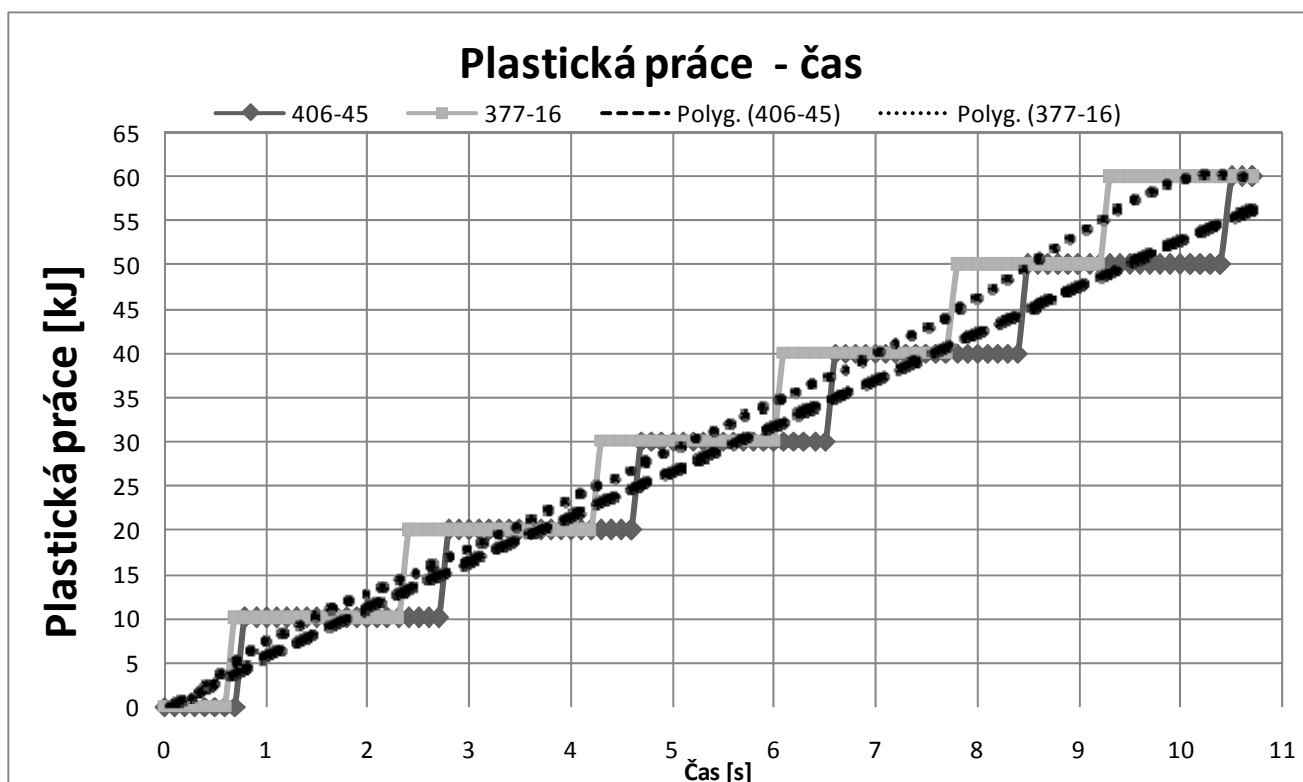
4.4 Parametry nástroje Tool3



Graf 11: Tool3 - zatížení - čas - osa X

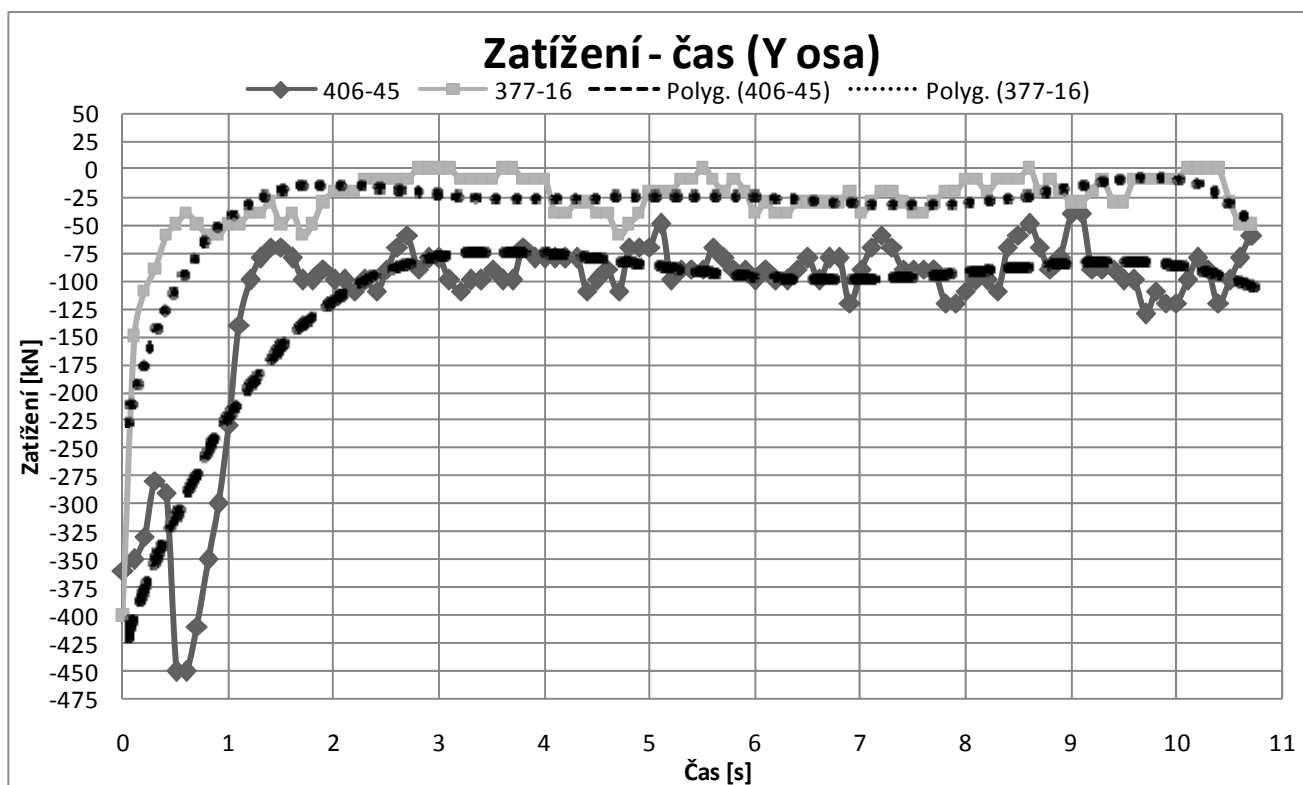


Graf 12: Tool3 - zatížení – čas – osa Y

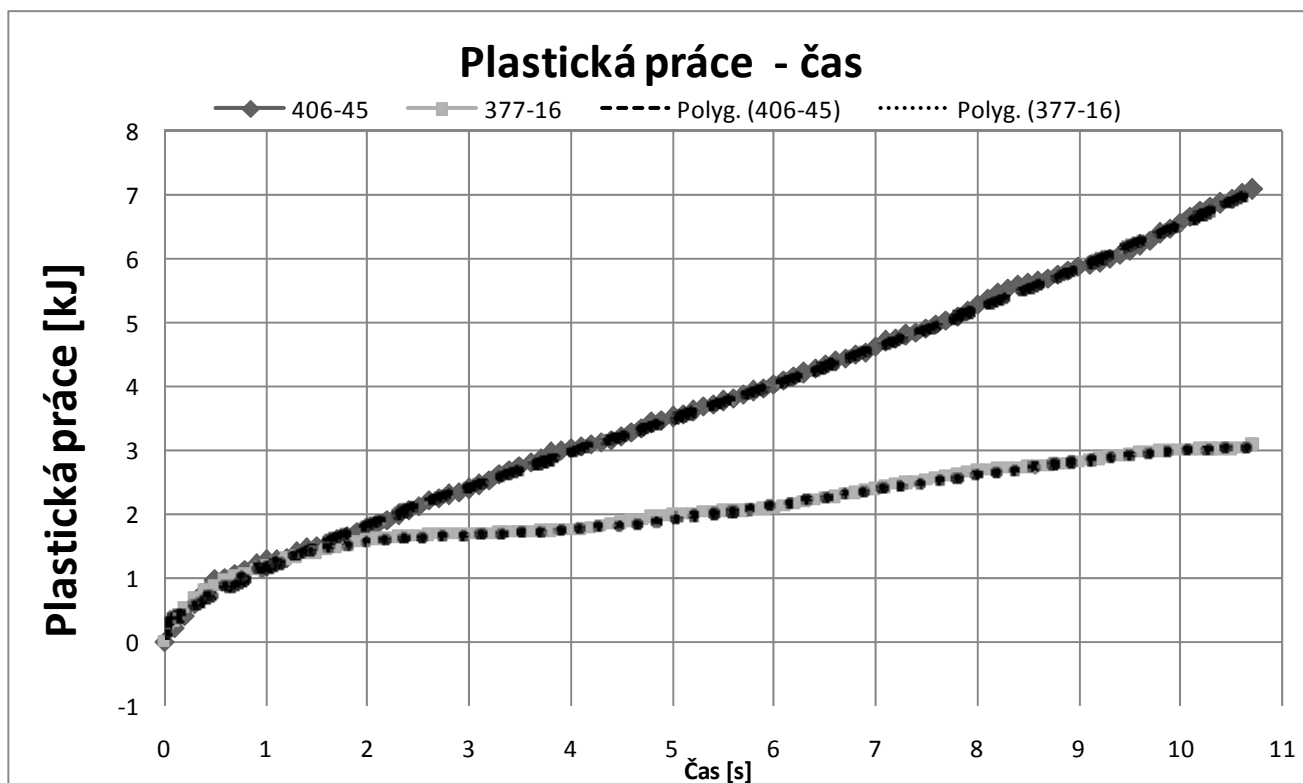


Graf 13: Tool3 - plastická práce – čas

4.5 Parametry nástroje Tool4



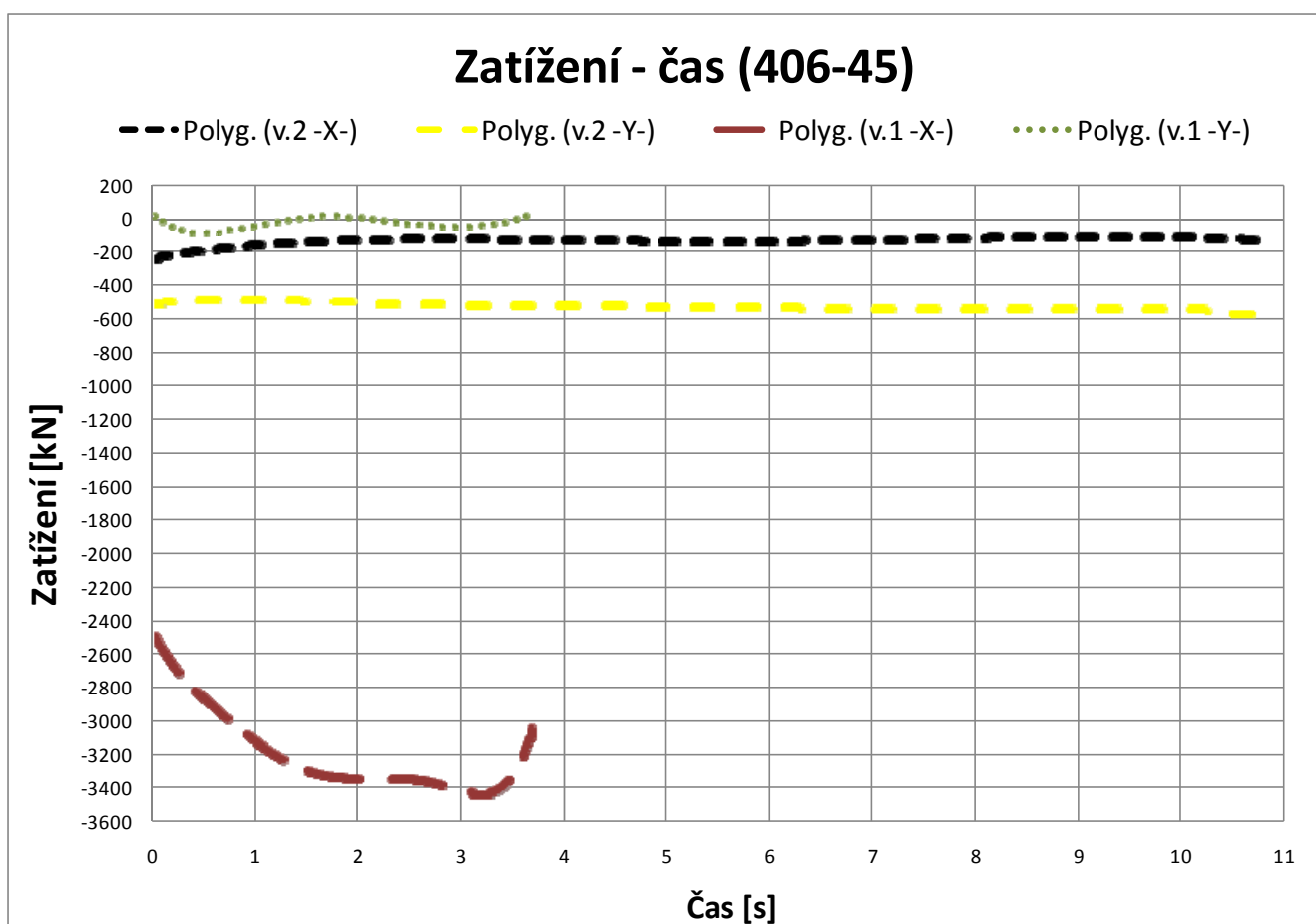
Graf 14: Tool4 - zatížení – čas – osa Y



Graf 15: Tool4 - plastická práce – čas

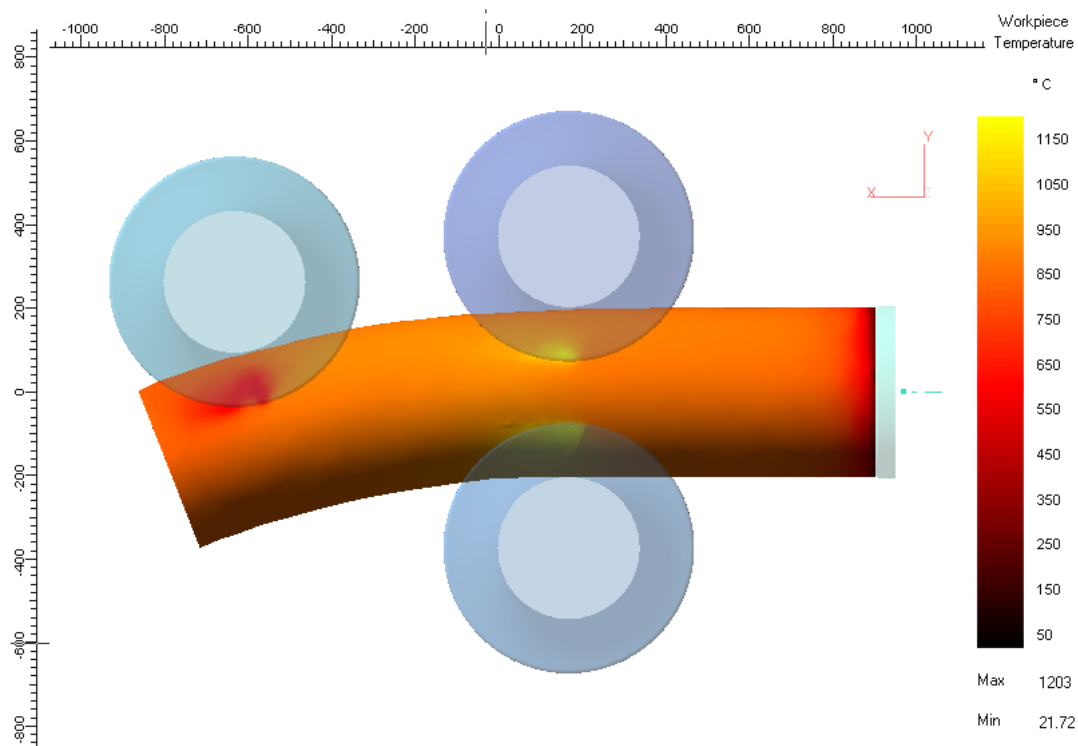
4.6 Porovnání modelů ohřevu

- Při první simulaci došlo k špatnému ohřevu trubky. Vlivem ovality se trubka neohřála dostatečně a zvýšily se silové poměry na kladky.
- V příloze na obr. 33 je zobrazena trubka 406-45, na které byl simulován ohřev pouze kladkami.
- V grafu je v. 1 označována první varianta výpočtu, označením v. 2 druhá verze výpočtu a označením -X- a -Y- rovina, ve které jsme dané síly naměřily.
- Z grafu je patrné, že v první verzi byly vyvinuty nižší síly na ohýbací kladce (TOOL 2) v rovině Y, ale v rovině X několikanásobně překročily síly potřebné ve verzi 2.

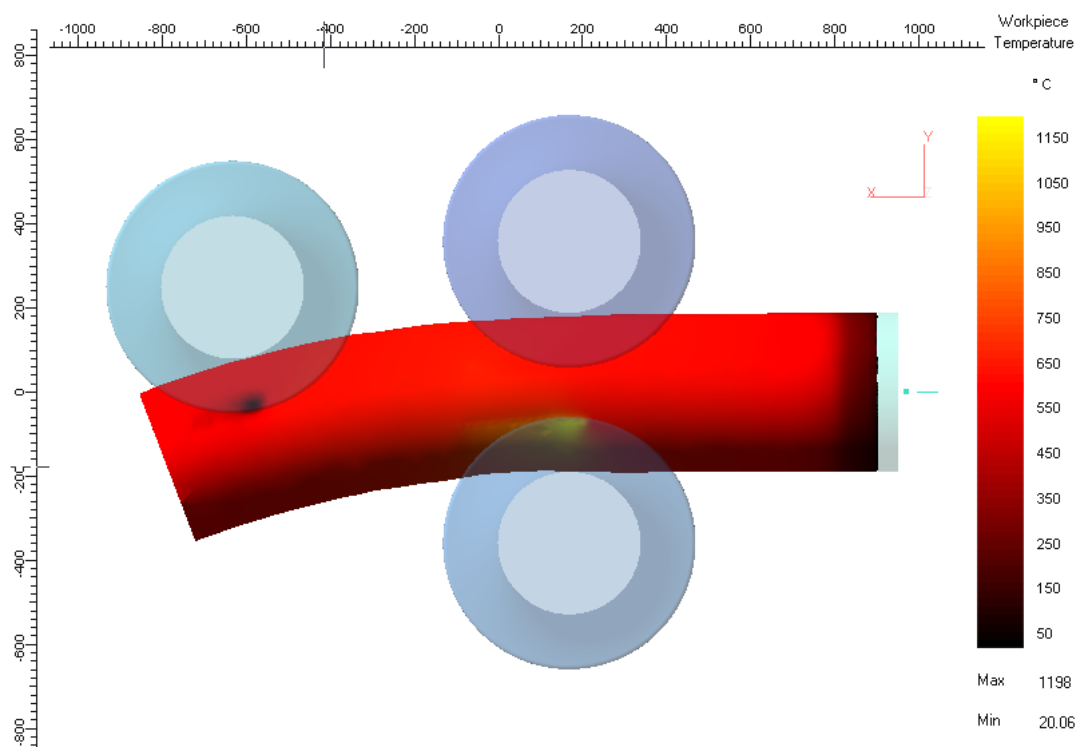


Graf 16: Zatížení – čas – osa X, Y ver.1 a ver.2

4.7 Distribuce teplotního pole

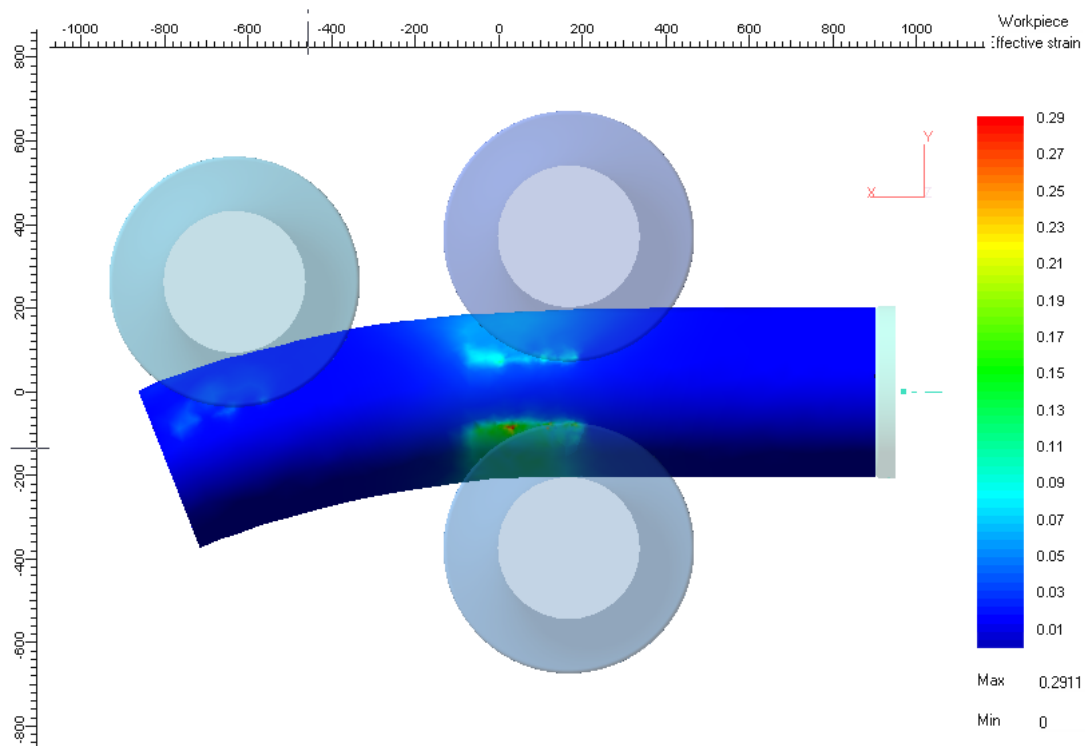


Obr. 23: 406-45 – distribuce tepl. pole

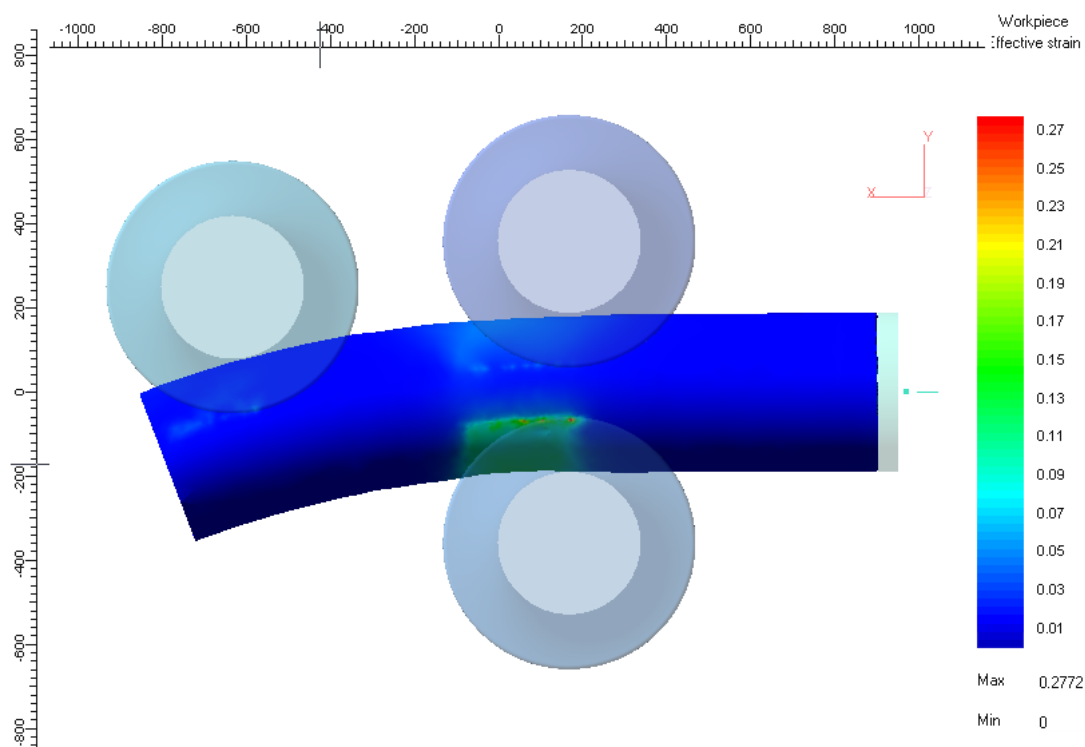


Obr. 24: 377-16 – distribuce tepl. pole

4.8 Efektivní deformace

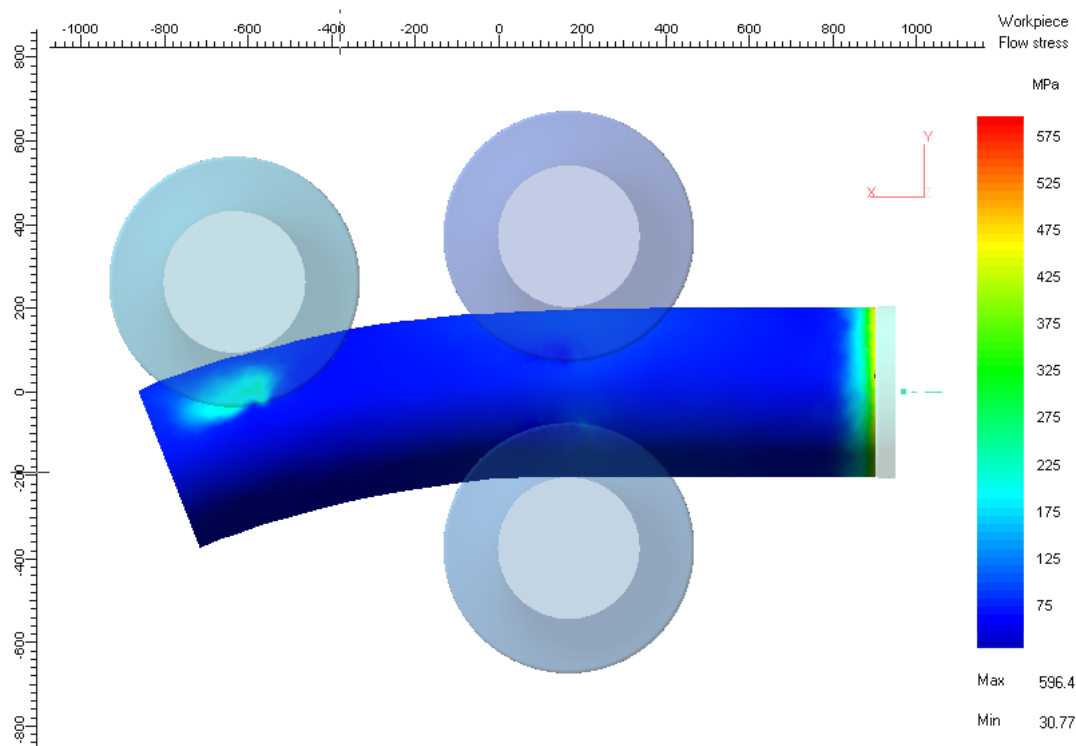


Obr. 25: 406-45 – efektivní deformace

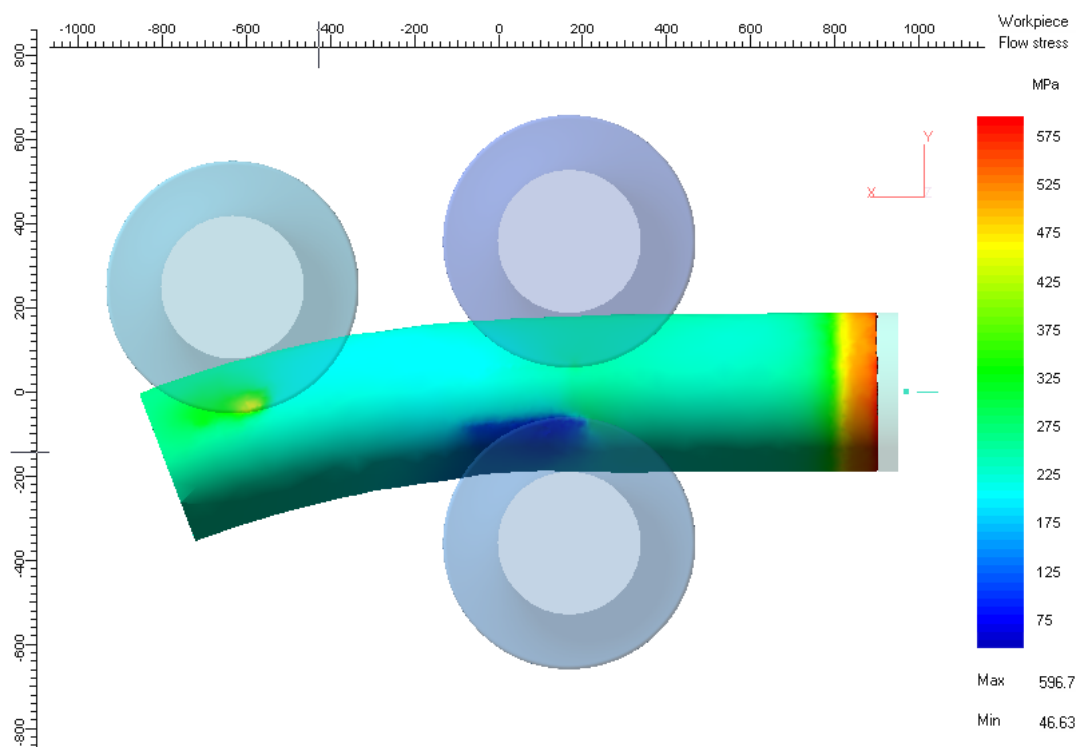


Obr. 26: 377-16 – efektivní deformace

4.9 Přetvárný odpor

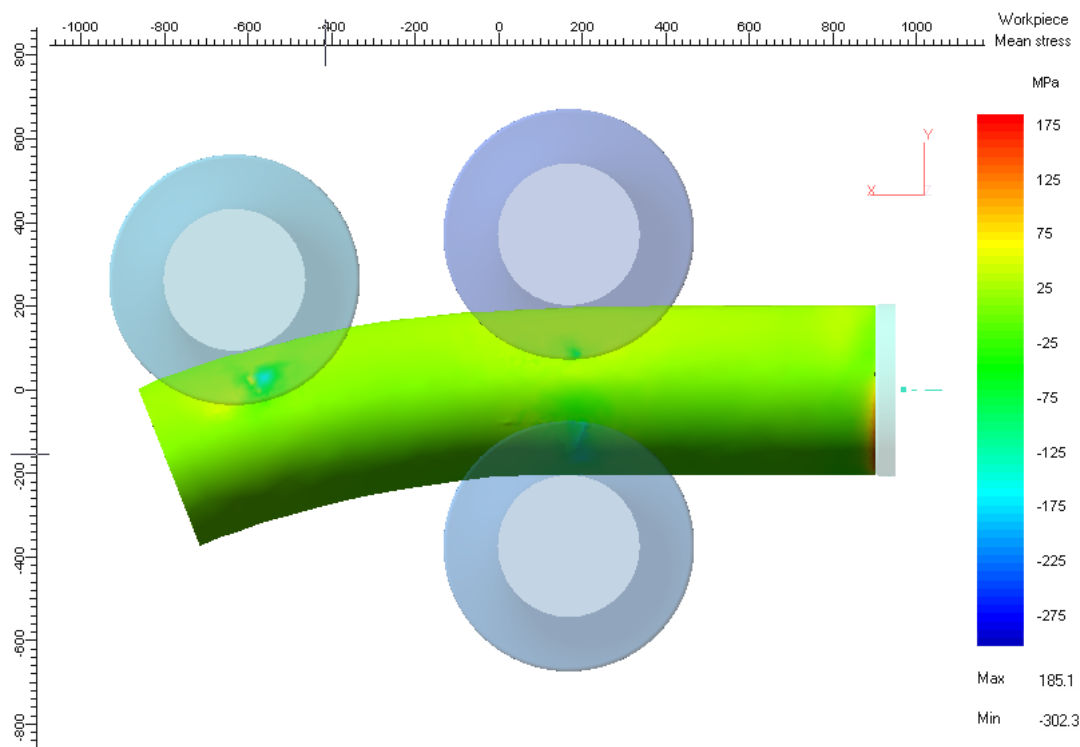


Obr. 27: 406-45 – přetvárný odpor

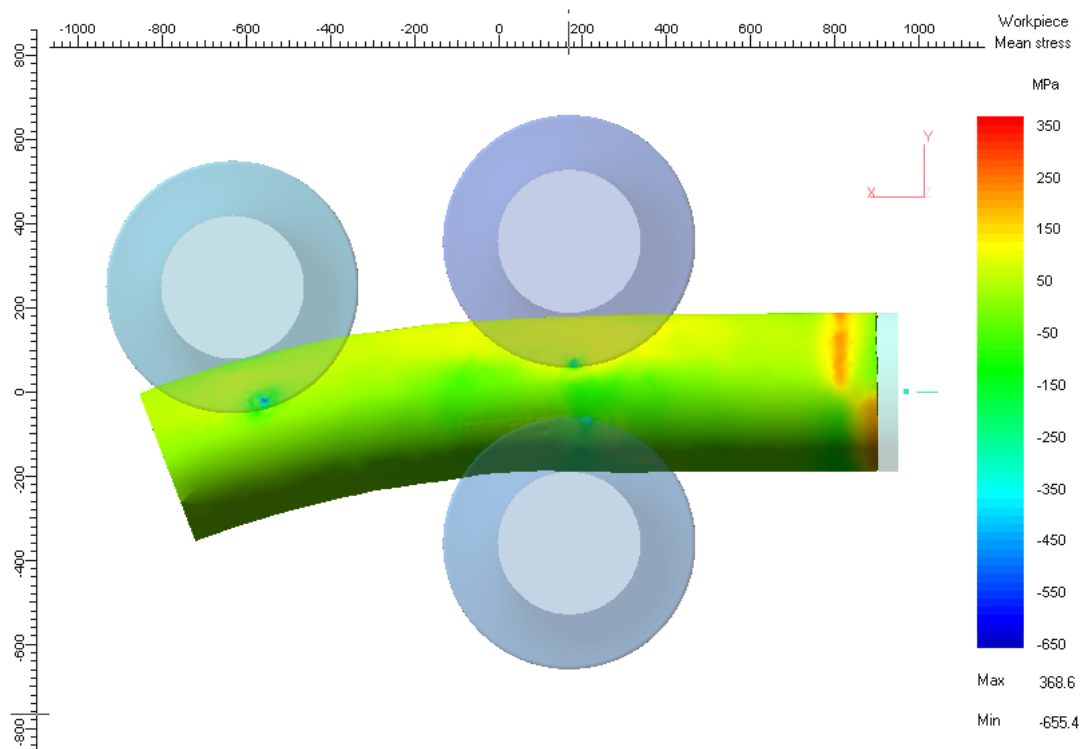


Obr. 28: 377-16 – přetvárný odpor

4.10 Střední napětí

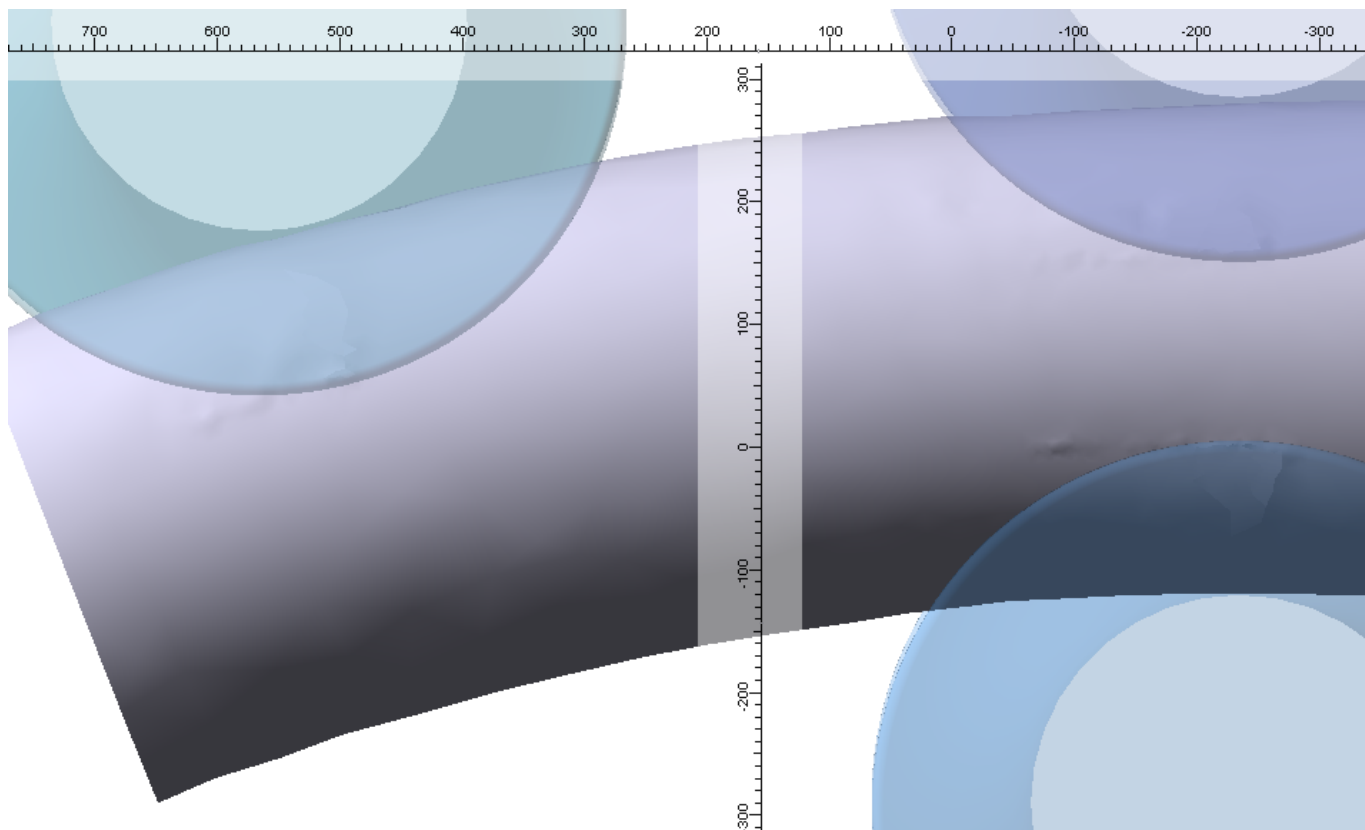


Obr. 29: 406-45 – střední napětí

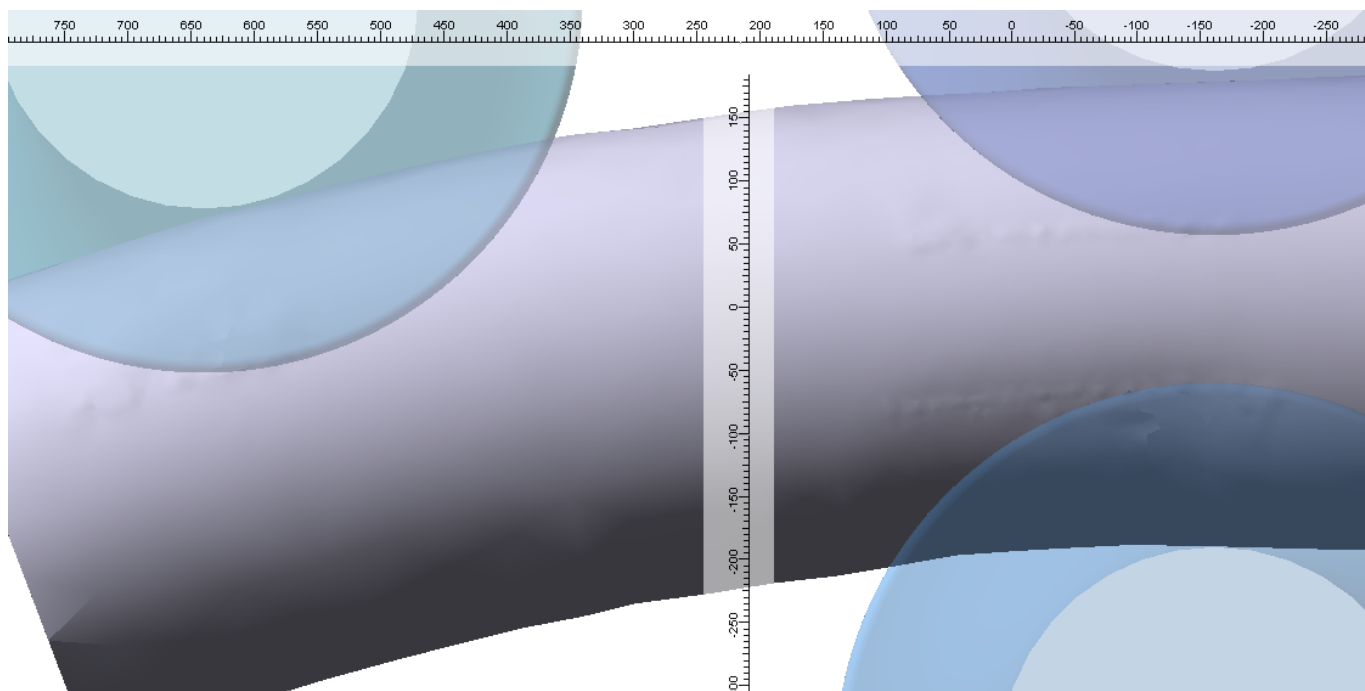


Obr. 30: 377-16 – střední napětí

4.11 Deformace trubky



Obr. 31: 406-45 – deformace trubky



Obr. 32: 377-16 – deformace trubky

5 Diskuze dosažených výsledků

- Cílem diplomové práce bylo provést analýzu technologie ohýbání trubek za tepla.
- V práci jsou představeny často používané technologie ohýbání trubek, u každé technologie jsou uvedeny základní informace a schémata sestavení nástrojů. Mezi technologiemi jsou zmíněné i poměrně nové technologie ohýbání, ať již ohýbání trubek laserovým paprskem či ohýbání trubek pomocí vnitřního média. Tyto technologie nepatří mezi rozšířené.
- Část práce se zabývá MKP či FEM (metoda konečných prvků), jsou popsány prvky používané v metodě MKP. A základní rovnice používané k řešení, tedy rovnice rovnováhy, geometrické rovnice a fyzikální vztahy.
- Vysvětleny jsou pojmy jako ovalita, neutrální osa, úhel odpružení, minimální poloměr ohybu atd.
- Práce obsahuje také analytickou část, ve které jsou popsány metody výpočtu jednotlivých parametrů, jak materiálových, rozměrových tak i technologických.
- Jsou vybráni dva rozměroví reprezentanti, u kterých se stanoví základní parametry nutné pro operace ohýbání, např.: minimální poloměr ohybu atd. Situace ohýbání je v první fázi vymodelována pro reprezentanty v software Pro/Engineer Wildfire.
- V druhé fázi je daný model převeden do formátu STEP, vložen a simulován v software ruské firmy Quantor Ltd. Qform3D 4.3.2.
- Provedená simulace v software Qform3D nám umožní s poměrně vysokou přesností zobrazit procesy odehrávající se v materiálu a odečíst tak hodnoty, které jsou pro nás stěžejní.
- Pro rozměrové reprezentanty 406/45 a 377/16 jsou uvedeny hodnoty sil působící na jednotlivé nástroje uvedeny v tabulce č.: 6. Nástroj TOOL1 reprezentuje tlačné zařízení, Tool 2 je ohýbací kladka, TOOL 3 vnitřní a TOOL4 vnější vodící kladka. Orientace rovin X a Y

je znázorněna v kapitole: 4.1 Schéma rozmístění nástrojů a jejich orientace, obrázek č.: 22.

12 040	TOOL 1	TOOL 2		TOOL 3		TOOL 4
	X	X	Y	X	Y	Y
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
Ø 406-45	230	250	570	130	1260	450
Ø 377-16	190	280	600	180	1210	400

Tab. 6 – Síly působící na nástroje

- S takto zjištěnými silami můžeme určit výkonnost stroje, který bude vyhovující pro provádění ohybu.
- Síly naměřené v tabulce vychází z příslušných grafů v kapitolách 4.2 až 4.5. Jedná se o extrémní grafy.
- Zjištěné síly se mohou ve skutečnosti lišit, ať již vlivem přijatých omezení, či z idealizovaných podmínek a vlastností materiálu a okolí.
- Na zkoumané trubce ať již 406-45 nebo 377-16 je pozorovatelná deformace povrchu, kapitola č.: 4.11 Deformace trubky, obrázek č.:31 a 32.
- Zařízení je nutné vybavit pojistkou, při nedostatečném prohrátí dojde k tvorbě extrémních sil. Jako při porovnání dvou modelů ohřevu v grafu č.:16

6 Seznam použité literatury

- [1] BABOR K., CVILINEK A., FIALA J.. *Objemové tváření oceli*. Spolupracoval Doc. Ing. HAŠEK V. Csc. Praha : SNTL, 1967. 332 s.
- [2] SEMIATIN S. L. a kol. *Metals handbook ninth edition, Vol. 14 Forming and Forging*. Ohio: Metals Park: ASM International, 1998. ISBN 08-7117-002-04
- [3] DRASTÍK F., ELFMAR J. a kol. . *Plastometry a tvářitelnost kovů*. Praha: SNTL, 1977. 392 s.
- [4] HRUBÝ J., RUSZ S., ČADA R.. *Strojírenské tváření*. 1. vydání Ostrava: VŠB-TU, 1993. 160 s. ISBN 80-7078-201-3
- [5] DVOŘÁK M., GAJDOŠ F., NOVOTNÝ K.. *Technologie tváření*. Brno: VUT fakulta strojního inženýrství, 2003. 169 s. ISBN 80-214-2340-3
- [6] *Přetvárný odpor* [online]. 3.4.2007, dostupné z :
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzeka/TTV/20Pretvar%20odporTT.pdf>>
- [7] *Tvářitelnost* [online]. 3.4.2007, dostupné z :
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzeka/TTV/20TvaritelnostTT.pdf>>
- [8] STANGE R., *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, inc., 1963. 1036 s.
- [9] *Qform komentář* [online]. 20.5.2007, dostupné z :
<<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/qform.htm>>
- [10] ČABELKA J. a kol, *Mechanická techológia*. Bratislava: VSAV, 1967
- [11] HRUBÝ J. *Silové poměry při ohýbání trubek v kladkové ohýbačce*. Opava: Inženýrský servis, 1997
- [12] HRUBÝ J. *Limity ohýbání trubek za tepla*. Opava: Inženýrský servis, 2000

- [13] HRUBÝ J. *Limity ohýbaní trubek ta tepla, dodatek 2000*.
Opava: Inženýrský servis, 2000
- [14] HRUBÝ J. *Výpočet reakcí do kladek ohýbacího stroje*.
Opava: Technické zkoušky a analýzy
- [15] Bohdan Bolzano – *technická příručka* [online]. 3.4.2007,
dostupné z : < <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka>>
- [16] Bohdan Bolzano – *přehled vlastností ocelí C35E (C35R)*
[online]. 3.4.2007, dostupné z :
http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/EN10083/Prehled_vlast_C35
- [17] *Nejčastější příčiny neuspokojivých ohybů a jejich odstranění*
[online]. 23.4.2009 <<http://www.omni-x.cz/cs/c/pruvodce-ohybanim/nejcastejsi-priciny-neuspokojivych-ohybu-a-jejich-odstraneni.htm>>
- [18] WENCHUAN Li, Y. LAWRENCE YAO: *Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction* [online].
18.4.2009
<<http://www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/Li4.pdf>>
- [19] HERBERT J. DOYLE: *Bending tubes, pipes, and other forms with low-melting-point alloys* [online]. 21.4.2009
<<http://www.tipsmag.net/Archives/0408/tubebending.pdf>>
- [20] VEERAOOAN A. R., SHANMUGAM S.: *Analysis for flexibility in the ovality and thinning limit sof pipe bends*
[online]. 20.4.2009
<http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2008/jeas_0208_82.pdf>

- [21] DVOŘÁK M., MAREČKOVÁ M.: Příklady [online].
15.4.2009
<http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/priklady_ohybani.htm>
- [22] SILVER P., McLEAN W., VEGLIO S., HARDINGHAM S.:
Fabrication: The Designers Guide. Architectural Press, 2006.
183 str. ISBN 07-5066-558-0
- [23] RUDNEV V., LOVELESS D., COOK R., BLACK M.:
Handbook of Induction Heating. CRC Press, 2002. 777 str.
ISBN 08-2470-848-2
- [24] HENZEL A., SPITTEL T.: *Rascet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. 73 str.
- [25] *Ohýbání za tepla a měkké žhání*. [online] 19. 4. 2007,
dostupné z: <<http://www.medportal.cz/trubky-v-tzb/odborna-instalace-medenych-trubek/ohybani-zatepla-a-mekke-zihani>>
- [26] Frick R. N., *Determining Tube Stress for CBEND Element Force and Moments*. [online] 13.4.2009, dostupné z :
<http://www.mssoftware.com/support/library/conf/wuc93/p06493.pdf>
- [27] *Běžné termíny užívané v oblasti trubek*. [online] dostupné z:
<http://www.omni-x.cz/cs/c/pruvodce-ohybanim/bezne-uzivane-termíny-v-oblasti-ohybani-trubek.htm>
- [28] MAG TOOL Inc., *TFB EMPTY-BENDING®*. [online] 15.4.2009
dostupné z :
<<http://www.magtool.net/toolsforbending.html>>
- [29] *Ruční ohýbání*. [online] 10.4.2009 dostupné z:
<http://www.medportal.cz/trubky-v-tzb/odborna-instalace-medenych-trubek/rucni-ohybani>

- [30] *Bending and Forming of Tubing.* [online] 15.4.2009
dostupné z:
<http://www.unifiedalloys.com/products/pdf_directory/main_collection/bending_forming.pdf>
- [31] Hwaiyu Geng. *Manufacturing engineering handbook.*
McGraw-Hill Professional, 2004. 1088 str, ISBN 00-7139-
825-2
- [32] *Produkty.*[online] 12. 4. 2009 dostupné z:
<<http://www.omni-x.cz/en/c/compound-tooling/products-2.htm>>
- [33] Hrubý J., *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - 1. Panel.* [online]
16.4.2009 dostupné z:<
http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>
- [34] Hrubý J., *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - 2. Panel.* [online]
16.4.2009 dostupné z:<
http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel2.pdf>
- [35] Hrubý J., *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - 3. Panel.* [online]
16.4.2009 dostupné z:<
http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel3.pdf>
- [36] Fink M., Řezníček L., *FEM/MKP - Základy použití metody
konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk
Inventor Professional.* [online] 17.4.2009 dostupné z:
<[www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-
vypocty/skripta-fem-mkp.pdf](http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf)>
- [37] *Technologie plošného tváření – ohýbání.* [online] 19.4.2009
dostupné z:
<[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/
sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)>

7 Seznam obrázků

1. Schéma kompresního ohýbání,
2. Schéma rotačního tažného ohýbání
3. Poloha při ohýbání 90° úhlu
4. Schéma ohýbání pomocí trnu
5. Schéma trnu (mandrel)
6. Schéma tlačného ohýbání
7. Schéma zakružovací technologie
8. Schéma laserového ohýbání
9. Doporučené teploty ohřevu
10. Ukázka ohýbacího aparátu pro velké ohyby za tepla
11. Ukázka automaticky generované sítě v MKP
12. Detail vytvořené sítě, v bodě dotyku dochází k automatickému zhuštění sítě.
13. Ukázka změny průřezu trubky po ohybu
14. Ovalita
15. Rozložení napětí na stěně trubky
16. Úhel odpružení
17. Rozměrové značení pro výpočet parametrů
18. Ohýbací zařízení ve firmě Jinpo Plus a.s.
19. Detail prstenců indukčního ohřevu a chlazení
20. Procesní model ohýbání
21. Pohled na sestavu již po přijetí zjednodušení
22. Schéma nástrojů a jejich popis pro grafy
23. 406-45 – distribuce tepl. Pole
24. 377-16 – distribuce tepl. Pole
25. 406-45 – efektivní deformace
26. 377-16 – efektivní deformace
27. 406-45 – přetvárný odpor
28. 377-16 – přetvárný odpor

- 29. 406-45 – střední napětí
- 30. 377-16 – střední napětí
- 31. 406-45 – deformace trubky
- 32. 377-16 – deformace trubky
- 33. Přenos teploty z kladek na polotovar
- 34. Typy trnů

8 Seznam grafů

1. Křivky prokalitelnosti pro materiál 12 040
2. Popouštěcí křivka pro materiál 12 040
3. Přetvárný odpor oceli 12 040
4. Tepelně závislé parametry materiálu 12 040
5. Modul pružnosti materiálu 12 040
6. Tool1 - zatížení – čas – osa X
7. Tool1 - zatížení – čas – osa Y
8. Tool2 - zatížení – čas – osa X
9. Tool2 - zatížení – čas – osa Y
10. Tool2 - plastická práce – čas
11. Tool3 - zatížení – čas – osa X
12. Tool3 - zatížení – čas – osa Y
13. Tool3 - plastická práce – čas
14. Tool4 - zatížení – čas – osa Y
15. Tool4 - plastická práce – čas
16. Zatížení – čas – osa X, Y ver.1 a ver.2

9 Seznam tabulek

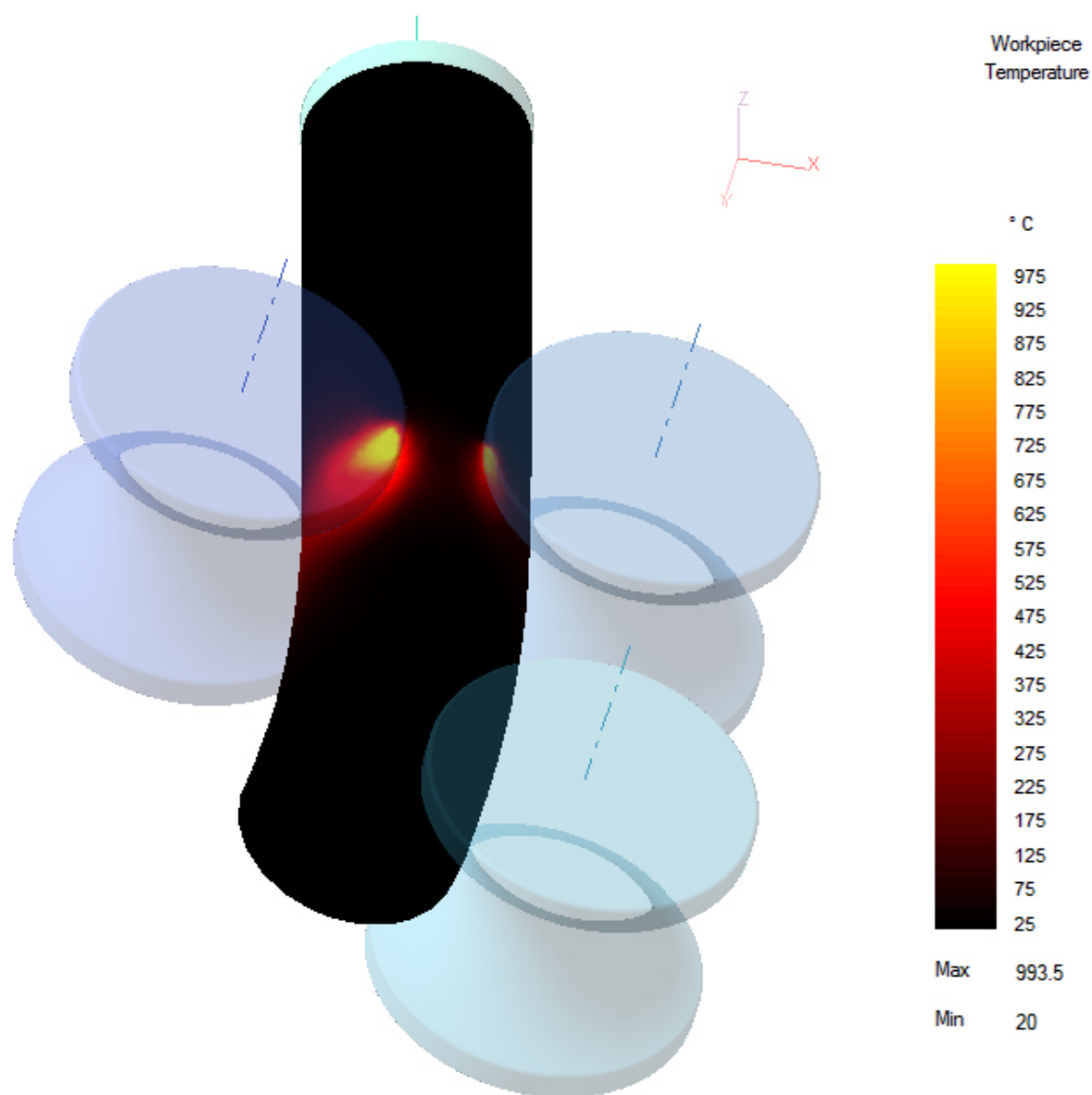
1. Hodnoty koeficientu x pro výpočet součinitele k
2. Parametry pro výpočet přetvárného odporu
3. Chemické složení oceli 12 040
4. Světové ekvivalenty
5. Podmínky tepelného zpracování oceli 12 040
6. Síly působící na nástroje
7. Typy maziv pro ohýbání s trnem

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Jiřímu Hrubému, Csc.
Za obětavou pomoc při vypracování diplomové práce.

V Králíkách dne 23. Května 2009

10 Přílohy

10.1 Teplotní pole při první verzi výpočtu pro 406-45



Obr. 33: Přenos teploty z kladek na polotovár

10.2 Užívané termíny v oblasti ohýbání trubek [27]

- **C.C.W.**
Counter clock wise - levotočivé otáčení - proti směru hodinových ručiček. U otáčivého ohýbání směr pohybu otočného ramena.
- **C.W.**
Clock wise - pravotočivé otáčení - po směru hodinových ručiček. U otáčivého ohýbání směr pohybu otočného ramena.
- **C.L.H.**
Center line height - výška střední linie. U ohýbačky vzdálenost od spodku matrice ke středu trubkové drážky na matrici.
- **C.L.R.**
Center line radius - střední rádius ohybu trubky.
- **Captive lip**
Vázaný přesah. U nástrojů, kde je drážka v matrici a na vyhlazovači hlubší než polovina průměru trubky. Používá se pouze u nástrojů se západkou (interlock) v leteckém průmyslu. Minimalizuje otláčení tenkostěnných trubek od matrice.
- **Carbide coating**
Karbidový nástrík. Povrchová úprava čelisti a čelisti matrice pomáhající neprokluzování trubky.
- **Compound tooling**
Skládané nástroje. Nástroje s velmi krátkým DBB (distance between bends - vzdálenost mezi ohyby) potřebují předchozí ohyb již zakomponovaný do čelisti a čelisti matrice. Tyto nástroje jsou drahé, ale mnohem praktičtější než případné nástroje s krátkým uchycením na matrici a krátkou čelistí.
- **D.O.B.**
Distance between bends. Vzdálenost mezi ohyby. Je vzdálenost mezi jednotlivými dvěma následnými body ohybu.

- **E-plane**
Týká se směru ohybu obdelníkových trubek. Trubka je do matrice umístěna vertikálně.
- **Galling**
Nabírání jednoho materiálu na druhý z důvodu velkého tlaku a tření. Objevuje se při ohýbání nerezových trubek pomocí ocelového trnu nebo ocelového vyhlazovače a také při ohýbání hliníkových trubek pomocí nástrojů z Ampca. Můžeme tomu zabránit pomocí lepších lubrikantů, změny materiálu nástrojů či zpomalením otáčení ramene ohýbačky.
- **H-plane**
Týká se směru ohybu obdelníkových trubek. Trubka je do matrice umístěna horizontálně.
- **Integral grip**
Integrovaná čelist matrice. Rovná část matrice sloužící k upnutí trubky (protikus k čelisti) končící bode ohybu.
- **I.S.R.**
Vnitřní rádius ohybu. Užívá se hlavně pro obdelníkové a čtveraté trubky. $ISR = CLR - \text{polovina } O.D.$
- **Knurl**
Rýhování. Povrchová úprava čelisti matrice a čelisti zabraňující proklouzávání trubky. Možné jemné i hrubší. Výhodou proti zoubkování je, že nedeformuje trubku ani na ní nezanechává viditelné stopy.
- **Mandrel extractor**
Vytahovač trnu. Hydraulický válec vysunující po ohybu trn z trubky. Nutný jen v případě, že ohýbáte pomocí trnu.
- **P.O.B.**
Plane of bend. Rotace mezi dvěma ohyby, udává se ve stupních.

- **Pressure die assist**

Podporovač přítlačné lišty. Hydraulický válec připojený k přítlačné liště tak, že ji tlačí zároveň s trubicí po celou dobu ohýbání. Snižuje tak riziko zhroucení tenkostěnných trubek a také napomáhá rovnoměrnějšímu rozprostírání materiálu, který se zhušťuje na vnitřní a ztenčuje na vnější straně ohybu. Je vhodný hlavně pro tenkostěnné trubky.

- **Radial growth**

Radiální růst. Po zohnutí trubky trubka odskočí dozadu a její poloměr se zvětší. Bude větší než CLR matrice. Radiální růst je největší pro CLR, které je alespoň třikrát větší než O.D. trubky a při ohýbání tvrdších materiálů.

- **Reverse interlock**

Reverzní západka. Nástroje se západkou jsou konstruovány tak, že vyhlazovač, čelist a přítlačná lišta zapadají do matrice. Použití hlavně pro velmi přesné ohyby (např. letectví) a velkoobjemové ohýbání.

- **Serration**

Zoubkování. Povrchová úprava čelisti matrice a čelisti sloužící k zamezení prokluzávání trubky. Obvykle se používá pro nástroje s délkou čelisti menší než trojnásobek O.D. Očekávejte deformaci trubky a viditelné stopy po zoubcích.

- **Springback**

Odskočení. Při ohýbání má materiál tendenci se vracet zpět do původní pozice a množství tohoto materiálu se nazývá odskočení. Závisí na ohýbaném materiálu a na CLR.

- **Thin wall mandrel**

- **Tube I.D.**

Vnitřní průměr trubky

- **Tube O.D.**

Vnější průměr trubky

- **Ultra thin wall mandrel**

– **Wall factor - WF**

Stěnový faktor. $WF = \frac{\varnothing \text{ trubky}}{\text{tloušťka trubky}}$

– **Wall**

Síla, tloušťka stěny trubky.

10.3 Základní typy maziva pro ohýbání s trnem

Polotovar	Mazivo
Nízko uhlíkové oceli	Vodné roztoky, rostlinné oleje
Nerezové a vysokolegované oceli	Minerální oleje
Hliníkové slitiny a slitiny mědi	Minerální oleje
Mosazi	Mýdelné roztoky
Za tepla ohýbané uhlíkové slitiny, a nerezové oceli	Sulfidy Molybdenu

Tab. 7: Typy maziv pro ohýbání s trnem

10.4 Typy trnů

[30]

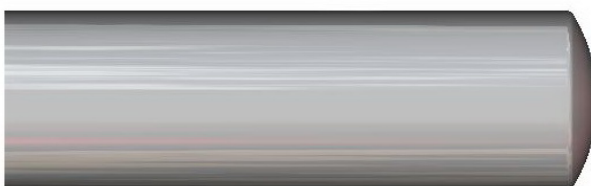
Laminátový trn



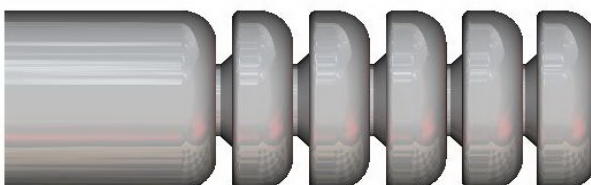
Tvarovaný trn



Čepový trn



Kuličkový
(segmentový) trn



Kuličkový
(segmentový) trn
s ocelovým lanem



Obr. 33: Typy trnů